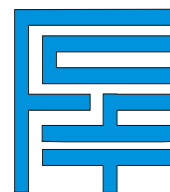


UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**APOYO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE EN
LA ASIGNATURA DE “TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN”**

Trabajo Dirigido, Por Adscripción, Presentado Para Optar al Diploma
Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Presentado por: MARIELA VIVIAN QUIROZ CRESPO

LUCAS ESTEBAN SALAMANCA OSUNA

Tutor: Ing. Osvaldo Antezana Moruno

COCHABAMBA – BOLIVIA

Diciembre, 2006

A Natalia, nuestra mayor motivación.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres por sus sacrificios, su apoyo, amistad y compañerismo.

A nuestras familias por su cariño y apoyo incondicional.

Al Lic. Osvaldo Antezana M. por su guía y tutela.

A la tía Maria M. por la ayuda y tiempo que nos brindó.

Al Ing. Arturo Etcheverría, y al Sr. José Herbas, de COBOCE Hormigón, por su colaboración y tutela.

A los docentes por sus consejos y enseñanzas.

A aquellos que en total desprendimiento nos abrieron sus puertas y nos brindaron su conocimiento y experiencia: IBNORCA, la planta de cemento COBOCE Irpa Irpa, la planta de hormigón COBOCE, SIKA Bolivia, al personal de la empresa constructora SERPREC durante la construcción de los colectores Recoleta y Muyurina.

A todos nuestros amigos y compañeros que nos ayudaron y apoyaron.

¡Muchas Gracias!

FICHA RESUMEN

Primeramente se consiguió una gran variedad de bibliografía entre la que se encuentra un CD con todos los manuales y comités de la ACI, además otro CD con normas de la ASTM, además por supuesto de bibliografía conocida de autores renombrados en nuestro medio. Para poder hacer uso de esta bibliografía, de la cual alguna se encontraba en Inglés, y otra con terminologías no usuales en nuestro medio, se contó con varios diccionarios Español-Inglés tanto técnicos como comunes, así como diccionarios técnicos en Español, con lo que logramos adecuar toda esta información a un español de fácil entendimiento en nuestro medio.

La mayor parte de los gráficos utilizados en el texto fueron copiados y redibujados digitalmente con el propósito de mostrar toda la información lo mas nitidamente posible y con unidades métricas.

Para un entendimiento profundo de los ensayos y los procedimientos de dosificación se acudió primeramente a IBNORCA, donde tuvimos acceso a la gran cantidad de normas bolivianas a las que cada profesional de nuestro medio debe regirse. Por otra parte tomamos contacto y realizamos una visita a la planta de cemento y agregados COBOCE Irpa Irpa, donde se siguió el procedimiento de fabricación del cemento siguiendo todos los controles de calidad que cumple un material como el cemento para ser aprobado. Finalmente fuimos acogidos en el laboratorio de hormigones de la empresa COBOCE Hormigón, donde realizamos con nuestras propias manos varios de los ensayos que rutinariamente se deben hacer a los materiales a utilizarse en el hormigón y al hormigón mismo. Diseñamos y preparamos mezclas de hormigón. Estas experiencias se capturaron en video y fueron plasmadas en este documento. Se preparo una presentación de los ensayos realizados en los laboratorios, que se complemento con la explicación concerniente a cada uno de estos.

Se logro adquirir un documental del canal "The History Channel", denominado "El Hormigón", en el cual se muestra desde la historia del hormigón, fabricación, sus múltiples usos y nuevas tecnologías. Se realizo el subtítulaje del mismo.

En los anexos se han incluido en formato digital Normas (EHE 99), Paginas web de soporte para los diferentes temas, manuales (de laboratorio, aditivos), resultados de ensayos, especificaciones de materiales. Todo esto como refuerzo, documentos de consulta, apoyo y complemento a todo lo tratado en este texto.

INDICE ANALITICO

MATERIALES

CEMENTOS

1.1. BREVE HISTORIA DEL CEMENTO	1
1.2. DEFINICIONES.....	1
1.3. PRODUCCIÓN.....	1
1.3.1. MATERIAS PRIMAS.....	1
1.3.2. EXTRACCIÓN	2
1.3.3. PROCESAMIENTO.....	2
1.3.3.1. TRITURACIÓN Y MOLIENDA.....	2
1.3.3.2. PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL CLINKER (VÍA SECA).....	3
1.3.3.3. MOLIDO DE ACABADO (MOLIENDA DE CEMENTO)	4
1.3.3.4. SISTEMAS DE CONTROL.....	4
1.4. COMPOSICIÓN DEL CEMENTO	5
1.4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA	5
1.4.2. EFECTO DE LOS COMPONENTES	6
1.5. HIDRATACIÓN DEL CEMENTO.....	8
1.5.1. CALOR DE HIDRATACIÓN.....	9
1.6. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL CEMENTO.....	10
1.6.1. FRAGUADO Y ENDURECIDO.....	10
1.6.2. FINURA	12
1.6.2.1. SUPERFICIE ESPECIFICA DEL CEMENTO	13
1.6.3. RESISTENCIA MECÁNICA.....	14
1.6.4. EXPANSIÓN.....	15
1.6.4.1. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA ESTABILIDAD DE VOLUMEN:.....	16
1.6.5. FLUIDEZ.....	17
1.7. TIPOS DE CEMENTO PÓRTLAND	17
1.8. SUMINISTRO Y ALMACENAMIENTO.....	22
1.9. CEMENTOS LOCALES	23
1.9.1. PLANTA DE FABRICACIÓN DE CEMENTO “COBOCE”	25

AGREGADOS

2.1. INTRODUCCIÓN	27
2.2. AGREGADOS EN EL HORMIGÓN.....	27
2.3. DEFINICIONES.....	28
2.3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA HORMIGÓN	28
2.3.1.1. POR SU PROCEDENCIA	28
2.3.1.2. POR SU TAMAÑO	28
2.3.1.3. POR SU GRAVEDAD ESPECIFICA	29
2.4. BÚSQUEDA Y EXPLORACIÓN.....	30
2.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS	31
2.5.1. TEXTURA SUPERFICIAL	32
2.5.2. FORMA DEL AGREGADO	32
2.5.2.1. COEFICIENTE DE FORMA (NB 610).....	33
2.5.3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL	34
2.5.3.1. PRUEBA DE ABRASIÓN LOS ÁNGELES (NB 302) (ASTM C 131).....	35
2.5.4. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN (ASTM C127 Y ASTM C128)	36
2.5.5. VACÍOS Y GRADACIÓN	38
2.5.5.1. MÓDULO DE FINURA (M.F).....	39
2.5.5.2. CURVAS GRANULOMÉTRICAS	41
2.5.5.3. TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO.....	43
2.6. COMBINACIÓN DE AGREGADOS	45
2.6.1. PROPORCIÓN DE MEZCLA DE DOS AGREGADOS	45
2.6.2. MÓDULO DE FINURA DE UNA MEZCLA	47
2.7. SUSTANCIAS PERJUDICIALES	48
2.7.1. POSIBLES SOLUCIONES	52
2.8. SUMINISTRO Y ALMACENAMIENTO.....	53
2.8.1. ESPONJAMIENTO DE LA ARENA HÚMEDA (ENTUMECIMIENTO)	54
2.9. AGREGADO DE HORMIGÓN RECICLADO.	55
2.10. AGREGADOS LOCALES.....	56
2.11. PRUEBAS PARA EL AGREGADO	61

AGUAS

3.1. AGUA DE AMASADO Y AGUA DE CURADO	65
3.2. CALIDAD	65
3.2.1. NORMAS	66

ADITIVOS

4.1. INTRODUCCIÓN	69
4.2. TIPOS Y USOS	69
4.2.1. REDUCTOR DE AGUA (PLASTIFICANTE)	71
4.2.2. REDUCTORES DE AGUA DE ALTO RANGO (SUPER-PLASTIFICANTES)	71
4.2.3. ACELERADOR	72
4.2.4. RETARDADORES	73
4.2.5. AGENTES INCLUSORES DE AIRE	74
4.2.6. IMPERMEABILIZANTES	75
4.2.7. ADITIVOS EXPANSORES	76
4.3. DOSIFICACIÓN	76
4.4. ALMACENAMIENTO	76
4.5. ADICIONES	77
4.6. RECOMENDACIONES	81
4.7. RESUMEN	83

ACEROS

5.1. INTRODUCCIÓN	85
5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS	85
5.2.1. SEGÚN SU COMPOSICIÓN QUÍMICA	85
5.2.1.1. ACEROS AL CARBONO	86
5.3. METODOS PARA ELEVAR EL LIMITE DE FLUENCIA	87
5.4. ACERO DE REFUERZO PARA HORMIGÓN ARMADO	87
5.4.1. BARRAS LISAS (NB 730)	88
5.4.2. BARRAS CORRUGADAS (NB 732)	88
5.4.3. MALLA DE ALAMBRE SOLDADO (MALLAS ELECTROSOLDADAS) (NB 733 Y NB 734)	89
5.4.4. FIBRA DE ACERO (ACI 544-1R)	90
5.4.4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS	90
5.4.4.2. ADICIÓN DE LAS FIBRAS EN EL HORMIGÓN	91
5.4.4.3. APLICACIONES Y VENTAJAS	91
5.4.5. ACERO PARA PREESFORZADO	92
5.4.5.1. HORMIGÓN PREESFORZADO	94
5.5. DIÁMETRO NOMINAL Y DIÁMETRO EQUIVALENTE	95
5.6. PROPIEDADES DEL ACERO	97
5.6.1. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	97
5.7. ENSAYOS PARA EL ACERO	101
5.7.1. ENSAYO DE TRACCIÓN (NB 736)	101
5.7.2. ENSAYO DE DUREZA	103
5.7.3. ENSAYO DE DOBLADO (NB 737)	104
5.7.4. ENSAYO DE ADHERENCIA POR FLEXIÓN (NB 740)	105
5.8. CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS	106
5.8.1. DOBLADO	106
5.8.2. EMPALMES	108
5.9. MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE BARRAS DE REFUERZO	108

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

TRABAJABILIDAD

6.1. INTRODUCCIÓN	110
6.1.1. MEDICIÓN DE LA TRABAJABILIDAD	110
6.2. EFECTO DE LOS COMPONENTES EN LA TRABAJABILIDAD	110
6.2.1. CEMENTO	110
6.2.2. AGREGADOS	111
6.2.3. ADITIVOS	111
6.3. SEGREGACIÓN	112
6.3.1. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA SEGREGACIÓN	112
6.3.2. EXUDACIÓN (SANGRADO)	113

RESISTENCIA

7.1. CONSIDERACIONES GENERALES	115
7.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (VER APARTADO 12.3.1.2)	115
7.3. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (VER APARTADO 12.3.1.2)	116
7.4. RESISTENCIA AL CORTE	116
7.5. ADHERENCIA	117
7.6. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA RESISTENCIA	117
7.6.1. MATERIALES	117
7.6.1.1. RELACIÓN AGUA/CEMENTO (A/C)	117
7.6.1.2. CONTENIDO DE CEMENTO	118
7.6.1.3. AGREGADOS	119
7.6.1.4. ADITIVOS	120
7.6.2. MÉTODO DE CURADO	121
7.6.3. TEMPERATURA DE CURADO	122
7.6.4. EDAD DEL HORMIGÓN EN LA PRUEBA	123
7.7. RELACIONES ENTRE VARIOS TIPOS DE RESISTENCIA	123
7.7.1. PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A 28 DÍAS	124
7.8. GANANCIA DE RESISTENCIA	124
7.8.1. GANANCIA RETARDADA DE RESISTENCIA	124
7.8.2. GANANCIA ACELERADA DE RESISTENCIA	125
7.9. MÓDULO DE ELASTICIDAD	125
7.9.1. GENERALIDADES	125
7.9.2. MÉTODO DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD	125
7.9.3. EFECTOS DE LAS VARIABLES SOBRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD (E_c)	126
7.9.4. RELACIONES ENTRE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD	126
7.10. RELACIÓN DE POISSON	126
7.11. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN BAJO CARGAS DINÁMICAS	127
7.11.1. FATIGA	127
7.11.1.1. MEJORA DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA	128
7.12. DEFINICIONES	129
7.13. OTRAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO	129

PERMEABILIDAD Y ABSORCIÓN

8.1. CONSIDERACIONES GENERALES	132
8.2. LA ESTRUCTURA POROSA DEL HORMIGÓN	132
8.3. PRUEBAS DE ABSORCIÓN Y PERMEABILIDAD	133
8.4. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA PERMEABILIDAD	134
8.4.1. MATERIALES	134
8.4.2. VACIADO Y CURADO	134
8.5. HERMETICIDAD AL AGUA E IMPERMEABILIZACIÓN	135
8.5.1. APLICACIONES SUPERFICIALES	135
8.6. RECOMENDACIONES	136

DURABILIDAD

9.1 INTRODUCCIÓN	137
9.2 INFLUENCIA DEL MEDIO AMBIENTE SOBRE LA DURABILIDAD	137
9.3 ATAQUE FÍSICO	138
9.3.1 CONGELACIÓN Y DESHIELO	138
9.3.2 HUMEDECIMIENTO Y SECADO	138
9.3.3 CAMBIOS DE TEMPERATURA	139
9.3.4 FUEGO	139
9.3.5 ABRASIÓN	140
9.3.5.1 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	141
9.4 ATAQUE QUÍMICO	141
9.4.1 ATAQUE POR ÁCIDOS	142
9.4.1.1 EFECTO DE LAS AGUAS NEGRAS	142
9.4.1.2 EFECTO DE OTROS ÁCIDOS	143
9.4.1.3 PROTECCIONES	143
9.4.2 ATAQUE POR SULFATOS	143
9.4.3 REACCIÓN ÁLCALI AGREGADO	144
9.4.4 CARBONATACIÓN	145
9.4.4.1 CAUSAS DE LA CARBONATACIÓN	145
9.4.5 CORROSIÓN DEL ACERO	146
9.4.6 EFECTO DE LA DISOLUCIÓN DEL HIDRÓXIDO DE CALCIO	147
9.5 PROTECCIONES	148
9.6 EFECTO DE DIVERSAS SUSTANCIAS SOBRE EL HORMIGÓN Y LOS TRATAMIENTOS PROTECTORES CORRESPONDIENTES	149
9.6.1 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	149

OTRAS PROPIEDADES

10.1. CAMBIOS DE VOLUMEN	153
10.1.1. EN EL HORMIGÓN FRESCO	153
10.1.2. EN EL HORMIGÓN ENDURECIDO	153
10.2. HOMOGENEIDAD	155
10.3. COMPACIDAD	155
10.4. PESO ESPECÍFICO	155
10.5. EL HORMIGÓN Y LA TEMPERATURA	156

DOSIFICACION

11.1. GENERALIDADES	158
11.2. CONSIDERACIONES PARA LA PROPORCIÓN DE LOS DISTINTOS MATERIALES	159
11.3. MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN	160
11.3.1. DOSIFICACIÓN CON BASE A EXPERIENCIA EN CAMPO Y/O EN MUESTRAS DE PRUEBA (ACI 318 – APARTADO 5.3)	160
11.3.2. PROPORCIONAMIENTO SIN MEZCLAS DE PRUEBAS O SIN REGISTRO EN LA OBRA	163
11.3.3. MÉTODOS TEÓRICOS DE DOSIFICACIÓN	163
11.3.3.1. MÉTODO ACI 211.1	163
EJEMPLO 1.- A CONTINUACIÓN SE DESARROLLARA UN EJEMPLO PARA UNA MEJOR COMPRESIÓN DEL MÉTODO ACI 211.1:	172
11.3.3.2. MÉTODO JIMÉNEZ MONTOYA, BASADO EN LA EHE	176
EJEMPLO 2.-	180
11.3.3.3. EJEMPLOS DE OTROS MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN (VER ANEXO 10)	181
EJEMPLO 3.- SEGÚN EL MÉTODO GARCÍA BALADO	181
EJEMPLO 4.- SEGÚN EL MÉTODO O'REILLY	183
EJERCICIO PROPUESTO.-	185
11.3.4. DETERMINACIÓN DE LAS PROPORCIONES MEDIANTE CURVAS DE RESISTENCIA PARA MEZCLAS DE PRUEBA	186
EJEMPLO 5.-	186
11.3.5. MEZCLAS PARA TRABAJOS PEQUEÑOS	187
11.3.6. DOSIFICACIÓN EN VOLUMEN	188
11.3.7. AJUSTES EN EL CAMPO	188
11.3.8. CONCLUSIONES	189

ENSAYOS

12.1. GENERALIDADES	190
12.2. ENSAYOS DEL HORMIGÓN FRESCO	190
12.2.1. TOMA DE MUESTRAS DEL HORMIGÓN FRESCO (NB 634 – ASTM C172)	190
12.2.2. ENSAYOS DE CONSISTENCIA	191
12.2.2.1. DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA POR EL MÉTODO DEL CONO DE ABRAMS (REVENIMIENTO) (NB 589; ASTM C143)	191
12.2.2.2. CONSISTÓMETRO VEBE (ASTM C1170)	193
12.2.3. DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO DEL HORMIGÓN FRESCO	195
12.2.4. CONTENIDO DE AIRE	195
12.3. ENSAYOS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO	196
12.3.1. ENSAYOS MECÁNICOS DE RESISTENCIA	196
12.3.1.1. ENSAYOS DESTRUCTIVOS	197
12.3.1.1.1 EQUIPO (ASTM C31)	197
12.3.1.1.2. PREPARACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LAS PROBETAS (NB-586; ASTM C31)	198
12.3.1.1.3. REFRENTADO DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS CON MORTERO DE AZUFRE (ASTM C617)	200
12.3.1.1.4. MÉTODOS DE ENSAYO DE PROBETAS DE HORMIGÓN	200
1) MÉTODO DE ENSAYO A COMPRESIÓN (NB 639)(ASTM C39)	200
2) MÉTODO DE ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN (NB 640)(ASTM C78)	202
3) MÉTODO DE ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA, (TENSIÓN HENDEDORA O ENSAYO BRASILEÑO) (NB 641)(ASTM C496)	203
12.3.1.1.5. EQUIVALENCIAS ENTRE LOS DISTINTOS ENSAYOS MECÁNICOS DE PROBETAS ENMOLDADAS	204
12.3.1.1.6. EXTRACCIÓN Y ENSAYO DE PROBETAS TESTIGO (NB 635; ASTM C42)	207
12.3.1.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	209
12.3.1.2.1. MÉTODOS ESCLEROMÉTRICOS	209
12.3.1.2.2. MÉTODOS POR VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN	211
12.3.1.2.3. MÉTODOS POR RESONANCIA (ASTM C-215)	212
12.3.1.2.4. MÉTODOS COMBINADOS O MIXTOS	213
12.3.1.2.5. MÉTODOS NUCLEARES	213
12.3.1.2.6. OTROS MÉTODOS	214
12.4. OTROS ENSAYOS	215

PUESTA EN OBRA

ENCOFRADO

13.1. OBJETIVOS BÁSICOS	216
13.2. DEFINICIONES	216
13.2.1. CLASIFICACION DEL ENCOFRADO	216
13.2.2. PARTES DEL ENCOFRADO	221
13.3. GENERALIDADES	222
13.3.1. APUNTALADO Y REAPUNTALADO DE ESTRUCTURAS DE VARIOS PISOS	224
13.4. DEFICIENCIAS EN EL ENCOFRADO	225
13.5. CARGAS SOBRE EL ENCOFRADO	226
13.6. RETIRO DE ENCOFRADOS Y SOPORTES	227
13.6.1. RECOMENDACIONES	227
13.6.2. DESENCOFRANTES (RESINAS Y BARNICES)	229

FABRICACION Y TRANSPORTE

FABRICACIÓN	231
14.1. FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN	231
14.1.1. DOSIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES (VER CAPITULO 11)	231
14.1.2. MEZCLADO DE LOS COMPONENTES	231
14.1.3. FORMAS DE PREPARAR	232
14.1.4. MEDICIÓN DE LOS MATERIALES	233
14.1.5. TIEMPO DE MEZCLADO	233
14.2. HORMIGÓN FABRICADO EN PLANTA (PREFABRICADO)	234
14.2.1. CONSIDERACIONES GENERALES	234
14.2.2. HOMOGENEIDAD Y UNIFORMIDAD	235
14.2.3. FORMAS DE ESPECIFICAR EL HORMIGÓN	235
14.2.4. TRANSPORTE A OBRA	236
TRANSPORTE	237
14.3. TRANSPORTE DEL HORMIGÓN EN OBRA	237
14.3.1. EQUIPO PARA MOVER O MANEJAR EL HORMIGÓN	237
14.3.2. EQUIPOS DE TRANSPORTE	239

COLOCACION

15.1. VACIADO	242
15.1.1. PREPARACIÓN DEL SITIO DE COLOCACIÓN	242
15.1.2. SECUENCIA DE VACIADO EN LOSAS	242
15.1.3. ELEMENTOS EMBEBIDOS	243
15.1.3.1. EMPALMES Y CONEXIONES MECÁNICAS	244
15.1.3.1.1. EMPALMES POR TRASLAPE	245
15.1.3.1.2. EMPALMES SOLDADOS	246
15.1.3.1.3. CONEXIONES MECÁNICAS	249
15.1.4. HORMIGONADO EN CASOS CORRIENTES	250
15.1.4.1. MÉTODOS CORRECTOS E INCORRECTOS DE MANEJO Y VACIADO DEL HORMIGÓN	252
15.1.5. OTROS MÉTODOS DE VACIADO DEL HORMIGÓN	253

COMPACTACION

16.1. COMPACTACIÓN	260
16.2. MÉTODOS DE CONSOLIDACIÓN	260
16.2.1. MÉTODOS MANUALES	261
16.2.2. MÉTODOS MECÁNICOS	262
16.2.2.1. COMPACTACIÓN POR VIBRADO	262
16.2.2.1.1. EL PROCESO DE COMPACTACIÓN	262
16.2.2.1.2. TIPOS DE VIBRADORES	263
16.2.2.1.3. REGLAS PARA UN BUEN VIBRADO	264
16.2.2.1.4. REVIBRADO	266
16.2.3. MÉTODOS ESPECIALES	267
16.3. ACABADO	269
16.3.1. EMPAREJADO	269
16.3.2. APLANADO	270
16.3.3. FROTACHADO	270
16.3.4. PLANCHADO (FIGURA 16.9)	271
16.3.5. CEPILLADO O RASTRILLADO	272
16.3.6. TEXTURAS SUPERFICIALES	273

JUNTAS

17.1. JUNTAS EN EL HORMIGÓN	275
17.2. TIPOS DE JUNTAS Y SU FUNCIÓN	276
17.2.1. JUNTAS DE CONTRACCIÓN	276
17.2.2. JUNTAS DE DILATACIÓN O AISLAMIENTO	278
17.2.2.1. UBICACIÓN DE LA JUNTA	281
17.2.3. JUNTAS DE HORMIGONADO O DE CONSTRUCCIÓN	283
17.2.3.1. REQUISITOS PARA LA CONSTRUCCIÓN	283
17.2.3.2. UBICACIÓN DE LA JUNTA	284
17.3. SELLANTES PARA JUNTAS	287
17.3.1. PROPIEDADES REQUERIDAS PARA LOS SELLANTES PARA JUNTAS	287
17.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SELLANTES PARA JUNTAS	287
17.4. MÉTODOS PARA LA REALIZAR JUNTAS	290
17.4.1. JUNTAS CON ENCOFRADO	290
17.4.2. JUNTAS HECHAS CON HERRAMIENTAS	291
17.4.3. JUNTAS HECHAS CON SIERRA	291
17.4.4. JUNTAS HECHAS CON MOLDES FORMADORES DE JUNTA	292

CURADO

18.1. DEFINICIÓN Y NECESIDAD	293
18.2. MÉTODOS DE CURADO	295
18.2.1. MÉTODOS DE CURADO BASADOS EN LA APLICACIÓN DE AGUA	296
18.2.2. MÉTODOS BASADOS EN LA RETENCIÓN DE LA HUMEDAD	296
18.2.3. CURADO AL VAPOR	298
18.3. PRECAUCIONES DURANTE EL CURADO	300
18.4. TEMPERATURA Y CURADO	300
18.4.1. CURADO EN CLIMA FRÍO	300
18.4.2. CURADO EN CLIMA CALIDO	301
18.4.3. DIFERENCIAS EXTREMAS DE TEMPERATURA	301
18.5. MÉTODO GRÁFICO PARA CALCULAR LA CANTIDAD DE AGUA EVAPORADA	302

HORMIGONADO EN TIEMPO FRIO Y CALIENTE

19.1. INTRODUCCIÓN	305
19.2. HORMIGONADO EN TIEMPO CALIENTE	305
19.2.1. GENERALIDADES	305
19.2.2. DEFINICIÓN DE TIEMPO CALIDO	306
19.2.3. PRINCIPALES PROBLEMAS EN TIEMPO CALIDO	306
19.2.3.1. DEFICIENCIAS DEL HORMIGÓN FRESCO	306
19.2.3.2. DEFICIENCIAS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO	306
19.2.4. MEDIDAS A TOMAR	307
19.3. HORMIGONADO EN TIEMPO FRÍO	308
19.3.1. DEFINICIÓN DE TIEMPO FRÍO	308
19.3.2. MEDIDAS DE PRECAUCIÓN	308
19.3.2.1. TEMPERATURA DE COLOCACIÓN	308
19.3.2.2. TEMPERATURA DE MEZCLADO	309
19.3.3. PREPARACIÓN PARA EL HORMIGONADO	310
19.3.4. ACELERACIÓN DEL FRAGUADO Y DESARROLLO DE LA RESISTENCIA	310
19.3.5. OBJETIVOS DE LA PROTECCIÓN	311

HORMIGONES ESPECIALES

20.1. INTRODUCCIÓN	313
20.2. HORMIGÓN MASIVO (EN MASA) (ACI 207.1R - 207.4R)	313
20.3. HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO. (ACI 207.5R, 325.10R)	314
20.4. HORMIGÓN LIGERO. (ACI 211.2; 213R; 304.5R)(ASTM C630-C632)	314
20.5. HORMIGONES EXPANSIVOS O ANTI-CONTRACCION. (ACI 223)	314
20.6. HORMIGÓN FIBRO-REFORZADO (ACI 544.1R - 544.4R; ACI 440R)	315
20.7. HORMIGÓN REFRACTARIO	315
20.8. HORMIGÓN SULFUROSO. (ACI 548.2R)	316
20.9. HORMIGÓN CON MICROSILICE (ACI 234R)	316
20.10. HORMIGÓN CON AGREGADO PRECOLOCADO (HORMIGÓN INYECTADO) (ACI 304.1R)(ASTM C953; C937-C943)	317
20.11. HORMIGÓN LANZADO (SHOTCRETE) (ACI 506R - 506.4R)	317
20.12. HORMIGÓN PESADO. (ACI 211.1)(ASTM C637, C638)	317
20.13. FERROCEMENTO	318

CONTROL DE CALIDAD

BASES GENERALES DEL CONTROL DE LA CALIDAD	320
21.1. CONTROL DE CALIDAD	320
21.2. CONTROL DE MATERIALES.....	320
21.2.1. CONTROL DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN	320
21.2.1.1. CEMENTO	320
21.2.1.2. AGUA DE AMASADO	321
21.2.1.3. ÁRIDOS	321
21.2.1.4. OTROS COMPONENTES DEL HORMIGÓN	322
21.3. CONTROL DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN	322
21.4. ENSAYOS PREVIOS DEL HORMIGÓN	323
21.5. ENSAYOS CARACTERÍSTICOS DEL HORMIGÓN	323
21.6. ENSAYOS DE CONTROL DEL HORMIGÓN	324
21.6.1. CONTROL A NIVEL REDUCIDO.....	324
21.6.2. CONTROL AL 100 POR 100.....	325
21.6.3. CONTROL ESTADÍSTICO DEL HORMIGÓN.....	325
21.6.4. DECISIONES DERIVADAS DEL CONTROL DE RESISTENCIA.....	327
21.7. ENSAYOS DE INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DEL HORMIGÓN	328
21.8. CONTROL DE LA CALIDAD DEL ACERO	329
21.8.1. GENERALIDADES.....	329
21.8.2. CONTROL A NIVEL REDUCIDO.....	329
21.8.3. CONTROL A NIVEL NORMAL	329
21.8.3.1. PRODUCTOS CERTIFICADOS	330
21.8.4. COMPROBACIÓN DE LA SOLDABILIDAD	330
21.8.5. CONDICIONES DE ACEPTACIÓN O RECHAZO DE LOS ACEROS.....	332
21.9. CONTROL DE LA EJECUCIÓN	333
21.9.1. GENERALIDADES.....	333
21.9.2. CONTROL A NIVEL INTENSO	335
21.9.3. CONTROL A NIVEL NORMAL	335
21.9.4. CONTROL A NIVEL REDUCIDO.....	335
21.10. ENSAYOS DE INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DE LA ESTRUCTURA	335
21.10.1. PRUEBAS DE CARGA	335
21.10.2. OTROS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (PTO. 12.3.1.4).....	338

ANEXOS

Anexo 1. MANUAL SIKA

Anexo 2. MANUAL DE LABORATORIO- ENSAYOS PARA EL HORMIGON

Anexo 3. TOLERANCIAS PARA BARRAS DE REFUERZO

Anexo 4. HERRAMIENTAS PARA PUESTA EN OBRA

Anexo 5. ENCOFRADOS

Anexo 6. CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES MARCAS DE CEMENTOS

Anexo 7. RESULTADOS DE ENSAYOS DE AGREGADOS PARA EL HORMIGON

Anexo 8. ACEROS

- CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES MARCAS DE ACEROS

- PLANILLA DE FIERROS

Anexo 9. ANÁLISIS DE AGUAS

Anexo 10. DOSIFICACIÓN

INDICE FIGURAS

MATERIALES

CEMENTOS

FIGURA 1.1	ESQUEMA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO PÓRTLAND, MOSTRANDO LOS POSIBLES PUNTOS DE CONTROL DE CALIDAD, EN LOS CUALES EL PRODUCTOR EXTRAE MUESTRAS.....	4
FIGURA 1.2	ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO MEDIANTE LA AGUJA DE VICAT	10
FIGURA 1.3	APARATO DE VICAT	10
FIGURA 1.4	CURVA DE FRAGUADO DE UN CEMENTO.....	11
FIGURA 1.5	HIDRATACIÓN DE LOS GRANOS DE CEMENTO EN FUNCIÓN A LA FINURA.....	12
FIGURA 1.6	PERMEABILIMETRO DE BLAINE.....	13
FIGURA 1.7	DETALLE DEL PERMEABILIMETRO DE BLAINE.....	13
FIGURA 1.8	PROBETAS CÚBICAS ENMOLDADAS	15
FIGURA 1.9	MAQUINA PARA MEDIR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	15
FIGURA 1.10	MÁQUINA MEZCLADORA	15
FIGURA 1.11	APARATO DE AUTOCLAVE	16
FIGURA 1.12	MEDICIÓN BRIQUETA APARATO DE AUTOCLAVE.....	16
FIGURA 1.13	MESA DE SACUDIDAS. ENSAYO DE FLUIDEZ.....	17
FIGURA 1.14	SILO MOVIL.....	23

AGREGADOS

FIGURA 2.1	RELACIÓN DE LA CONTRACCIÓN S DEL HORMIGÓN (CEMENTO+AGREGADO+AGUA) A LA CONTRACCIÓN S_0 DE LA PASTA (CEMENTO+AGUA) EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE AGREGADO CONTENIDO EN EL HORMIGÓN.	27
FIGURA 2.2	MÁQUINA DE ABRASIÓN DE LOS ÁNGELES	35
FIGURA 2.3	ESTADOS DE SATURACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	36
FIGURA 2.4	ÁRIDOS DE GRANULOMETRÍA CONTINUA – MÍNIMOS VACÍOS.....	39
FIGURA 2.5	SERIE DE TAMICES	39
FIGURA 2.6	GRAFICA DE GRADACIONES DEL AGREGADO. GRADACIÓN DE LA ARENA A LA IZQUIERDA Y LA DEL AGREGADO GRUESO A LA DERECHA. (DATOS DE LA TABLA 2.5 Y 2.6)	41
FIGURA 2.7	PARÁBOLA DE FULLER Y CURVA DE BOLOMEY	43
FIGURA 2.8	MÉTODO SENCILLO PARA DETERMINAR EL PORCENTAJE DE MATERIAL FINO.....	51
FIGURA 2.9	ENSAYO DEL COLORÍMETRO	52
FIGURA 2.10	VOLUMEN DE ARENA SUELTA PARA HORMIGÓN VS. EL CONTENIDO DE HUMEDAD.....	54
FIGURA 2.11	AGREGADO DE HORMIGÓN RECICLADO	55
FIGURA 2.12	UBICACIÓN DE LOS BANCOS DE ACOPIO ANALIZADOS.....	57
FIGURA 2.13	ZARANDAS SOPORTADAS POR PUNTALES.....	57

ADITIVOS

FIGURA 4.1	EFFECTO DE UN SUPER-PLASTIFICANTE	72
FIGURA 4.2	AHORROS POSIBLES EN CEMENTO POR EL USO DE UN REDUCTOR DE LA CANTIDAD DE AGUA.....	72
FIGURA 4.3	EFFECTO DE LOS RETARDADORES Y DE LOS ACELERANTES EN LA RESISTENCIA.....	73
FIGURA 4.4	EFFECTOS DEL CONTENIDO DE AIRE SOBRE LA DURABILIDAD, LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y EL CONTENIDO REQUERIDO DE AGUA DEL HORMIGÓN.....	75
FIGURA 4.5	INFLUENCIA DEL AIRE INCLUIDO SOBRE LA RESISTENCIA DEL Hº CON DISTINTO CONTENIDOS DE CEMENTO.	75
FIGURA 4.6	CONTENIDO DE AIRE OCLUIDO SEGÚN EL TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO.	75

ACEROS

FIGURA 5.1	PASADORES DE JUNTAS, EN UNA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO.	88
FIGURA 5.2	CARACTERÍSTICAS DE LAS BARRAS CORRUGADAS.....	88
FIGURA 5.3	IDENTIFICACIÓN DE LAS BARRAS DE ACERO.....	89
FIGURA 5.4	MALLA DE ALAMBRE SOLDADO	89
FIGURA 5.5	PLANO ESQUEMÁTICO	89
FIGURA 5.6	DIFERENTES GEOMETRÍAS PARA FIBRAS DE ACERO.....	91
FIGURA 5.7	VIGAS POSTENSADAS	93
FIGURA 5.8	VAINA PARA POSTENSADO, EMBEBIDAS EN UNA VIGA, ANTES DEL VACIADO.....	93
FIGURA 5.9	TIPOS DE EMPAQUES PERMITIDOS POR LA ACI.	97
FIGURA 5.10	A) DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA ACEROS DE DUREZA NATURAL LAMINADOS EN CALIENTE; B) CURVAS TÍPICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIAS PARA BARRAS DE REFUERZO	99
FIGURA 5.11	DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA ACEROS DE RESISTENCIA MAYOR A 4200 KG/CM ²	100
FIGURA 5.12	ESQUEMA DE UNA MÁQUINA PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	102
FIGURA 5.13	CARGA VS ALARGAMIENTO.....	102
FIGURA 5.14	MAQUINA DE TRACCIÓN	102
FIGURA 5.15	DETERMINACIÓN DEL ALARGAMIENTO	103
FIGURA 5.16	APARATO BRINELL.....	104
FIGURA 5.17	APARATO ROCKWELL.....	104
FIGURA 5.18	ESQUEMA DEL ENSAYO DE DOBLADO	104
FIGURA 5.19	ESQUEMA DE LA PROBETA PARA EL ENSAYO DE ADHERENCIA POR FLEXIÓN	105
FIGURA 5.20	DOBLADO DEL ACERO EN OBRA	106
FIGURA 5.21	ATADURA TÍPICA	107

PROPIEDADES DEL HORMIGON

RESISTENCIA

FIGURA 7.1	VARIACIÓN DE LA ADHERENCIA CON LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN. ...	117
FIGURA 7.2	EFFECTO DE LA RELACIÓN A/C EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y A LA FLEXIÓN A LOS 28 DÍAS.	118
FIGURA 7.3	EFFECTO DEL CONTENIDO DE CEMENTO SOBRE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN.....	119
FIGURA 7.4	RELACIÓN DE LA SUPERFICIE ESPECÍFICA DEL CEMENTO CON LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.	119
FIGURA 7.5	VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO CON EL TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO PARA DIVERSAS RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN.....	120
FIGURA 7.6	EFFECTO DEL CONTENIDO DE AIRE SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.	121
FIGURA 7.7	EFFECTO DEL SECADO AL AIRE SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CURADO EN HÚMEDO.	121
FIGURA 7.8	EFFECTO DEL CURADO SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.	121
FIGURA 7.9	RESISTENCIA RELATIVA DEL HORMIGÓN SEGÚN ES ALTERADA POR LA TEMPERATURA DE ALMACENAMIENTO. RELACIÓN A/C = 0.53 EN PESO, REVENIMIENTO DE 8 A 13CM.	122
FIGURA 7.10	EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN.	122
FIGURA 7.11	CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN PARA EL HORMIGÓN.	126
FIGURA 7.12	DEFORMACIÓN DEL HORMIGÓN.....	130

PERMEABILIDAD Y ABSORCION

FIGURA 8.1	RELACIÓN ENTRE LA PERMEABILIDAD HIDRÁULICA, LA RELACIÓN A/C Y EL CURADO INICIAL DE ESPECIMENES DE HORMIGÓN.....	134
FIGURA 8.2	EFFECTO DE LA AMPLITUD DEL PERIODO DE CURADO SOBRE LA PERMEABILIDAD	135

DOSIFICACION

FIGURA 11.1	DISTRIBUCIÓN NORMAL DE FRECUENCIAS DE DATOS DE RESISTENCIA TOMADOS DE 46 PRUEBAS.....	161
FIGURA 11.2	RELACIONES ENTRE LA RELACIÓN A/C Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.....	167
FIGURA 11.3	DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS Y PRUEBAS.....	187

ENSAYOS

FIGURA 12.1	EQUIPO PARA EL ENSAYO DE REVENIMIENTO	192
FIGURA 12.2	ENSAYO DE REVENIMIENTO.....	192
FIGURA 12.3	CONSISTÓMETRO VEBE.....	193
FIGURA 12.4	CONSISTÓMETRO DE VEBE (MESA VIBRATORIA)	195
FIGURA 12.5	PROBETAS PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y A TRACCIÓN INDIRECTA	197
FIGURA 12.6	DETALLE DEL PLATO SUPERIOR, Y LA PROBETA	201
FIGURA 12.7	ENSAYO DE ROTURA A COMPRESIÓN. A LA DERECHA SE PUEDEN VER 2 PROBETAS LUEGO DE LA ROTURA, LA DE LA DERECHA POR FALLA LATERAL, Y LA OTRA POR FALLA TRONCOCÓNICA	201
FIGURA 12.8	MÉTODO DE ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN.....	202
FIGURA 12.9	ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN	203
FIGURA 12.11	VALORES DE LA RELACIÓN F_{CJ}/F_{C28}	206
FIGURA 12.12	COEFICIENTES DE CONVERSIÓN RESPECTO A 28 DÍAS DE EDAD, EN LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A TRACCIÓN	206
FIGURA 12.13	PACÓMETRO	208
FIGURA 12.14	EL MARTILLO DE SHMIDT. A LA IZQUIERDA UNA ILUSTRACIÓN ESQUEMÁTICA, A LA DERECHA EL ENSAYO SOBRE UNA PROBETA CILÍNDRICA	210
FIGURA 12.15	FORMA APROXIMADA DE LA ZONA DE FALLA EN EL HORMIGÓN DURANTE ENSAYO DE PENETRACIÓN	211
FIGURA 12.16	A) EFECTOS DE LOS DEFECTOS EN EL TIEMPO DE VIAJE DE UN PULSO ULTRASÓNICO	212

PUESTA EN OBRA

ENCOFRADOS

FIGURA 13.1	ENCOFRADO AUTOPORTANTE	216
FIGURA 13.2	ENCOFRADO DE MURO UNIDO POR TIRANTES.....	217
FIGURA 13.3	ENCOFRADO PILA DE PUENTE.....	217
FIGURA 13.4	ENCOFRADO DE SILO.....	218
FIGURA 13.5	A) ENCOFRADO DE VIGAS DE PUENTE. B) ENCOFRADO DE LOSA.....	219
FIGURA 13.6	ENCOFRADO DE PILAR CIRCULAR.	219
FIGURA 13.7	ENCOFRADOS DE DOBLE ARCO DE CURVATURA (CIMBRAS Y MATRICES).....	220
FIGURA 13.8	A) ENCOFRADO DE VIGA PREESFORZADA	220
FIGURA 13.9	A) PUNTALES DE MADERA B) PUNTALES METÁLICOS.....	221
FIGURA 13.10	A) ANDAMIOS METÁLICOS.	221
FIGURA 13.11	A) ARRIOSTRAMIENTO DIAGONAL.....	222
FIGURA 13.12	ELEMENTOS DEL ENCOFRADO. A. APUNTALADO, B. ENCOFRADO VIGA, C. DETALLE DEL PUNTAL, D. ENCOFRADO DE COLUMNA RECTANGULAR, E. ENCOFRADO DE MURO.....	223
FIGURA 13.13	REAPUNTALADO. INAPROPIADA POSICIÓN DE PUNTALES DE PISO A PISO PUEDE CREAR ESFUERZOS DE FLEXIÓN PARA LOS CUALES NO ESTÁ DISEÑADA LA LOSA.....	225
FIGURA 13.14	LA PREVENCIÓN DE ROTACIÓN ES IMPORTANTE CUANDO LA LOSA LLEGA A LA VIGA SOLO POR UN LADO.	226
FIGURA 13.15	SECUENCIA DE DESENCOFRADO PARA LOSAS EN DOS DIRECCIONES.....	228
FIGURA 13.16	ENCOFRADO Y APUNTALADO EN JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN.....	229

FABRICACION Y TRANSPORTE

FIGURA 14.1.	FABRICACIÓN SEMINDUSTRIAL	232
FIGURA 14.2.	FABRICACIÓN RÚSTICA.....	232
FIGURA 14.3.	FABRICACIÓN EN PLANTA: A LA IZQUIERDA BALANZA DOSIFICADORA DE AGREGADOS, ARRIBA DER. SILOS DE ALIMENTACIÓN DE CEMENTO, ABAJO DER. CAMIÓN MIXER, AL CENTRO LA CASETA DE CONTROL	234
FIGURA 14.4.	CAMIÓN MIXER DESCARGANDO POR BOMBEO EL HORMIGÓN PARA UN PAVIMENTO EN EL DISTRIBUIDOR DE LA RECOLETA	237
FIGURA 14.5.	CARRETILLA.....	240
FIGURA 14.6.	GUINCHE ELEVANDO CARRETÓN CON HORMIGÓN	240
FIGURA 14.7.	CUCCHARÓN	240

COLOCACION

FIGURA 15.1.	SECUENCIA DE VACIADO A) TIRAS LARGAS, RECOMENDADAS B) TABLERO DE AJEDREZ, NO RECOMENDADO	243
FIGURA 15.2.	ATADURA TÍPICA	244
FIGURA 15.3.	A) GALLETAS PARA MANTENER EL ENCOFRADO A LA DISTANCIA ESPECIFICADA DE RECUBRIMIENTO, B) GALLETAS PARA MANTENER LA ARMADURA EN SU POSICIÓN EN UNA VIGA CAJÓN, C) CABALLETES PARA MANTENER LA ARMADURA EN SU POSICIÓN, EN UNA LOSA, DURANTE LA PUESTA EN OBRA, Y D) CABALLETES UTILIZADOS PAR MANTENER LAS GUÍAS DE LA REGLA VIBRATORIA DURANTE EL VACIADO, Y ACABADO.....	245
FIGURA 15.4.	DETALLE DE EMPALMES POR TRASLAPE EN COLUMNAS.....	246
FIGURA 15.5.	A) Y B) EMPALME SOLDADO DE TRASLAPE SENCILLO C) EMPALME SOLDADO CON DOBLE RANURA EN V SENCILLA (PARA VARILLAS COLOCADAS EN POSICIÓN HORIZONTAL) D) EMPALMES DIRECTOS A TOPE PARA VARILLAS COLOCADAS EN POSICIÓN VERTICAL. E) SOLDADURA CON RANURA EN BISEL SENCILLO. F) SOLDADURA CON RANURA EN DOBLE BISEL.	249
FIGURA 15.6.	DISTINTOS TIPOS DE CONEXIONES MECÁNICAS: A) ESTAMPADO EN FRÍO, B.) ACOPLER ESTAMPADOS EN FRÍO CON ROSCA, B.1) DE 2 PIEZAS B.2) DE 3 PIEZAS, B.3) DE TRANSICIÓN; C) ACOPLER PARA BARRAS CORRUGADAS EN FORMA DE ROSCA; D) ACOPLER RELLENOS CON ACERO, PARA TRACCIÓN-COMPRESIÓN.....	250
FIGURA 15.7.	A MENOS QUE LA DESCARGA DE LA MEZCLADORA SE CONTROLE CORRECTAMENTE, SE DESTRUYE LA UNIFORMIDAD RESULTANTE DE UN MEZCLADO EFICAZ, POR LA SEGREGACIÓN.	254
FIGURA 15.8.	MÉTODOS CORRECTOS E INCORRECTOS PARA CARGAR Y DESCARGAR CUCCHARONES Y CARRETONES PARA EL HORMIGÓN. EL PROCEDIMIENTO CORRECTO MINIMIZA LA SEPARACIÓN DEL AGREGADO GRUESO DEL MORTERO.....	255
FIGURA 15.9.	CONTROL DE LA SEGREGACIÓN DEL HORMIGÓN	256
FIGURA 15.10.	MÉTODOS CORRECTOS E INCORRECTOS DE VACIAR EL HORMIGÓN.....	257
FIGURA 15.11.	VACIADO DEL HORMIGÓN EN ENCOFRADOS ANGOSTOS Y CURVOS.	258

COMPACTACION

FIGURA 16.1.	PISON MANUAL.....	261
FIGURA 16.2.	VIBRADOR INTERNO LIQUIDIFICANDO HORMIGÓN DE BAJO REVENIMIENTO.....	262
FIGURA 16.3.	REGLAS VIBRATORIAS	264
FIGURA 16.4.	VIBRADOR EXTERNO O DE CONTACTO, SOBRE EL ENCOFRADO DE UN MURO.....	265
FIGURA 16.5.	MÉTODOS CORRECTOS E INCORRECTOS DE COMPACTACIÓN.	268
FIGURA 16.6.	A) ACABADO DE UNA LOSA CON APLANADORA DE MANGO LARGO, UTILIZADA PAR ALCANZAR LUGARES QUE NO SE PUEDEN LLEGAR CON EL BRAZO B) ACABADO DE UN PAVIMENTO CON REGLA VIBRATORIA Y LUEGO APLANADORA DE MADERA.	270
FIGURA 16.7.	FROTACHADO MANUAL.....	271
FIGURA 16.8.	FROTACHADO MECANIZADO CON UNA MAQUINA ROTATORIA DOBLE	271
FIGURA 16.9.	PLANCHADO.....	271
FIGURA 16.10.	RASTRILLADO.	272
FIGURA 16.11.	TEXTURIZADOS	273
FIGURA 16.12.	SECUENCIA DE ACABADO	274

JUNTAS

FIGURA 17.1	GRIETA FORMADA EN UNA LOSA DE HORMIGÓN.	275
FIGURA 17.2	FISURAS DE UN MURO LARGO DEBIDO A LA CONTRACCIÓN.	276
FIGURA 17.3	GRIETA FORMADA A LO LARGO DEL PATRÓN DE LA JUNTA. NÓTESE QUE LA GRIETA SIGUE EL PLANO DE LA JUNTA.	276
FIGURA 17.4	UBICACIÓN DE LAS JUNTAS DE CONTRACCIÓN EN EDIFICIOS SEGÚN RECOMENDACIÓN DE LA ASOCIACIÓN DE CEMENTO PÓRTLAND.	277
FIGURA 17.5	JUNTAS DE CONTRACCIÓN EN UN MURO DE CONTENCIÓN.	278
FIGURA 17.6	JUNTA DE DILATACIÓN. EDIFICIO MULTIFUNCIONAL U.M.S.S.	279
FIGURA 17.7	2 COLUMNAS COMPARTIENDO LA MISMA ZAPATA.	279
FIGURA 17.8	TAPAJUNTAS EN UNA JUNTA DE EXPANSIÓN DE UN MURO.	279
FIGURA 17.9	BARRAS DE ACERO PARA TRANSFERENCIA DE CARGA EN UNA LOSA DE CALZADA DEL DISTRIBUIDOR VEHICULAR DE LA MUYURINA.	280
FIGURA 17.10	BARRAS DE ACERO PARA TRANSFERENCIA DE CARGA EN UNA LOSA.	280
FIGURA 17.11	JUNTAS DE DILATACIÓN EN CAMBIOS DE GEOMETRÍA.	282
FIGURA 17.12	JUNTA DE DILATACIÓN EN LA BASE DE COLUMNAS.	283
FIGURA 17.13	DIAGRAMA DE MOMENTOS Y CORTANTES. PUNTOS DE CORTANTES MÍNIMO O PUNTOS DE INFLEXIÓN Y MOMENTOS MÁXIMOS.	285
FIGURA 17.14	JUNTA DE HORMIGONADO HORIZONTAL ENTRE UNA LOSA Y UNA VIGA.	285
FIGURA 17.15	UBICACIÓN Y TIPOS DE JUNTAS EN UNA LOSA DE HORMIGÓN.	286
FIGURA 17.16	UBICACIÓN DE LAS JUNTAS DE HORMIGONADO ENTRE VIGAS, LOSAS Y COLUMNAS.	286
FIGURA 17.17	WATERSTOPS METÁLICOS.	288
FIGURA 17.18	PLASTOFORMO EN JUNTAS DE DILATACIÓN.	290
FIGURA 17.19	JUNTA DE HORMIGONADO CON ENCOFRADO, EN FORMA DE LLAVE.	291
FIGURA 17.20	CANALEADOR.	291
FIGURA 17.21	ASERRADO DE JUNTA EN UNA LOSA DE HORMIGÓN.	292
FIGURA 17.22	PERFIL FORMADOR DE JUNTAS EN UN MURO DE HºAº.	292

CURADO

FIGURA 18.1	RESISTENCIA AL A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE 15X30CM EN FUNCIÓN AL ENVEJECIMIENTO PARA DIFERENTES CONDICIONES DE CURADO.	293
FIGURA 18.2	DIFERENCIA ENTRE UN HORMIGÓN PROTEGIDO Y UNO NO PROTEGIDO Y CON LA PRESENCIA DE VIENTO, RESPECTO A LA APARICIÓN DE AGRIETAMIENTO PLÁSTICO.	294
FIGURA 18.3	ADITIVO FORMADOR DE MEMBRANA DE CURADO.	297
FIGURA 18.4	CICLO TÍPICO DE CURADO A VAPOR.	298
FIGURA 18.5	RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA 18 HORAS Y EL PERIODO DE RETRAZO PREVIO A LA APLICACIÓN DE VAPOR. EN CADA CASO, EL PERIODO DE RETRAZO MÁS EL PERIODO DE APLICACIÓN DE VAPOR, TOTALIZAN 18 HORAS.	299
FIGURA 18.6	NOMOGRAMA PARA LA ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE EVAPORACIÓN DE UN ENTORNO, ASUMIENDO UNA SUPERFICIE CUBIERTA POR AGUA EN LA CUAL LA TEMPERATURA DEL AGUA ES IGUAL A LA TEMPERATURA DEL HORMIGÓN. (MENZEL 1954; NRMCA 1960).	303

HORMIGONADO EN TIEMPO FRIO Y CALIENTE

FIGURA 19.1.	EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO, EN EL ESFUERZO DE COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.	307
--------------	--	-----

HORMIGONES ESPECIALES

FIGURA 20.1.	FIBRAS SINTÉTICAS.	316
--------------	-------------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

MATERIALES

CEMENTOS

TABLA 1.1	PORCENTAJES TÍPICOS DE INTERVENCIÓN DE LOS ÓXIDOS.....	5
TABLA 1.2	ESPECIFICACIONES FÍSICAS PARA LOS CEMENTOS SEGÚN LA NORMA BOLIVIANA Y LA ASTM.....	14
TABLA 1.3	CATEGORÍAS DE RESISTENCIA DE LOS CEMENTOS.....	14
TABLA 1.4	VALORES DE EXPANSIÓN.....	16
TABLA 1.5	COMPARACIÓN DE NORMAS INTERNACIONALES, PARA CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO PÓRTLAND TIPO I 40.....	18
TABLA 1.6	ESPECIFICACIONES QUÍMICAS PARA LOS CEMENTOS TIPO I.....	18
TABLA 1.7	CARACTERÍSTICAS DE LOS CEMENTOS PÓRTLAND*.....	20
TABLA 1.8	COMPOSICIÓN TÍPICA DE LOS COMPUESTOS DE LOS CEMENTOS PÓRTLAND.....	20
TABLA 1.9	RESISTENCIAS DE LOS CEMENTOS TIPO I, II, III, IV Y V.....	20
TABLA 1.10	MARCAS DE CEMENTO EN BOLIVIA Y LOS TIPOS DE CEMENTO PRODUCIDOS.....	24
TABLA 1.11	CLASIFICACIÓN Y COMPOSICIÓN DE LOS CEMENTOS SEGÚN LA NB 011.....	24
TABLA 1.12	CARACTERÍSTICAS Y CRITERIOS DE EMPLEO DE LOS CEMENTOS PÓRTLAND.....	25

AGREGADOS

TABLA 2.1	VALORES PROMEDIO PARA LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS TIPOS PRINCIPALES DE ROCAS.....	29
TABLA 2.2	LIMITACIONES FÍSICO-MECÁNICAS SEGÚN LA EHE.....	30
TABLA 2.3	RESUMEN DE PROPIEDADES DE INGENIERÍA DE LAS ROCAS.....	31
TABLA 2.4	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ROCAS DE USO COMÚN COMO AGREGADOS DEL HORMIGÓN.....	34
TABLA 2.5	CÁLCULO DEL MÓDULO DE FINURA PARA UN AGREGADO FINO.....	40
TABLA 2.6	CÁLCULO DEL MÓDULO DE FINURA PARA UN AGREGADO GRUESO.....	40
TABLA 2.7	MÓDULO DE FINURA DE ÁRIDOS QUE SIGUEN LA PARÁBOLA DE FULLER SEGÚN EL TAMAÑO MÁXIMO DE ÁRIDO.....	42
TABLA 2.8	VALORES DE "A" PARA LA PARÁBOLA DE BOLOMEY.....	43
TABLA 2.9	REQUISITOS DE GRADACIÓN PARA LOS AGREGADOS GRUESOS.....	44
TABLA 2.10	REQUISITOS DE GRADACIÓN PARA LOS AGREGADOS FINOS.....	44
TABLA 2.11	TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO, SEGÚN LA ACI Y EL EHE.....	44
TABLA 2.12	LÍMITES PARA LAS SUSTANCIAS PERJUDICIALES EN EL AGREGADO PARA HORMIGÓN SEGÚN LA EHE.....	49
TABLA 2.13	LÍMITES PARA LAS SUSTANCIAS PERJUDICIALES EN EL AGREGADO FINO PARA HORMIGÓN SEGÚN LA ACI.....	50
TABLA 2.14	LÍMITES PARA LAS SUSTANCIAS PERJUDICIALES EN EL AGREGADO GRUESO PARA HORMIGÓN SEGÚN LA ACI.....	51
TABLA 2.15	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE LA ARENA.....	58
TABLA 2.16	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE LA GRAVA.....	58

AGUAS

TABLA 3.1	REQUISITO PARA HORMIGÓN EXPUESTO A SOLUCIONES QUE CONTIENEN SULFATOS E ION CLORURO.....	66
TABLA 3.2	LÍMITES DE LAS SUSTANCIAS PARA AGUA USADA EN LA MEZCLA.....	67
TABLA 3.3	VALORES LÍMITE DE PARÁMETROS QUÍMICOS.....	68

ADITIVOS

TABLA 4.1	EFFECTOS DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ADITIVOS EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN.....	77
TABLA 4.2	PRODUCTOS SIKI.....	77
TABLA 4.3	ADITIVOS COLORANTES ACEPTABLES.....	80
TABLA 4.4	RECOMENDACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES MÁXIMAS DEL IÓN CLORURO, EN PORCENTAJE EN PESO DEL CEMENTO*.....	82
TABLA 4.5	EFFECTOS PRINCIPALES DE LOS ADITIVOS.....	83
TABLA 4.6	CLASIFICACIÓN DE LOS ADITIVOS PARA HORMIGÓN.....	83

ACEROS

TABLA 5.1	CLASIFICACIÓN SEGÚN LA NORMA BOLIVIANA NB 728.....	87
TABLA 5.2	DIÁMETRO, PESO NOMINAL Y SECCIÓN NOMINAL DE LOS ACEROS.....	96
TABLA 5.3	GRADOS Y DIÁMETROS DE MARCAS EXISTENTES EN EL MERCADO.....	96
TABLA 5.4	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS MÍNIMAS GARANTIZADAS.....	101
TABLA 5.5	CARACTERÍSTICAS DE ADHERENCIA, VALORES MÍNIMOS.....	105
TABLA 5.6	DIÁMETRO DE LOS EJES DE DOBLADO SEGÚN LA NORMA BOLIVIANA.....	106
TABLA 5.7	DIÁMETRO MÍNIMO DE LOS EJES DE DOBLADO SEGÚN LA ACI.....	107
TABLA 5.8	CUANTÍAS GEOMÉTRICAS, MÍNIMAS, REFERIDAS A LA SECCIÓN TOTAL DE HORMIGÓN. (EN TANTO POR MIL).....	107

PROPIEDADES DEL HORMIGON

RESISTENCIA

TABLA 7.1	CRITERIOS EN BASE A LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SEGÚN LA NB, LA EHE Y LA ACI.....	115
TABLA 7.2	DESARROLLO DE LA RESISTENCIA EN RELACIÓN A LA RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS	123
TABLA 7.3	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, CON RELACIÓN A LA RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS.....	124
TABLA 7.4	DEFINICIONES DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SEGÚN LA CBH 87, EHE Y LA ACI	129
TABLA 7.5	RESISTENCIA MÍNIMA DEL HORMIGÓN EN FUNCIÓN DEL TIPO DE ACERO	130
TABLA 7.6	DEFORMACIONES DEL HORMIGON	131

PERMEABILIDAD Y ABSORCION

TABLA 9.1.	CONTENIDO TOTAL DE AIRE INCLUIDO PARA UN HORMIGÓN RESISTENTE A LA CONGELACIÓN	138
TABLA 9.2.	RECUBRIMIENTOS MÍNIMOS PARA EL REFUERZO SEGÚN LA ACI 318	147
TABLA 9.3.	RECUBRIMIENTOS MÍNIMOS SEGÚN LA EHE	148
TABLA 9.4.	REQUISITOS PARA EL HORMIGÓN EXPUESTO A SOLUCIONES QUE CONTIENEN SULFATOS.....	148
TABLA 9.5.	REQUERIMIENTOS ESPECIALES PARA CONDICIONES ESPECIALES DE EXPOSICIÓN.....	149
TABLA 9.6.	EFFECTO QUE TIENEN DIFERENTES SUSTANCIAS SOBRE EL HORMIGÓN, Y SUS RESPECTIVOS TRATAMIENTOS	151

OTRAS PROPIEDADES

TABLA 10.1	ACCIÓN DE LAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE EL HORMIGÓN	156
------------	--	-----

DOSIFICACION

TABLA 11.1	INFLUENCIA DE ALGUNOS FACTORES EN LA TRABAJABILIDAD Y RESISTENCIA DEL HORMIGÓN	159
TABLA 11.2	FACTOR DE MODIFICACIÓN PARA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR CUANDO SE DISPONE DE MENOS DE 30 PRUEBAS	161
TABLA 11.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROMEDIO REQUERIDA, F'_{CR} , CUANDO SE TIENEN DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR	162
TABLA 11.4	RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN REQUERIDA CUANDO NO HAY DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR	162
TABLA 11.5	REVENIMIENTO RECOMENDADO PARA VARIOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN	164
TABLA 11.6	REQUERIMIENTOS DE AGUA DE MEZCLADO Y AIRE INCLUIDO PARA DIFERENTES REVENIMIENTOS Y TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO	166
TABLA 11.7	RELACIONES ENTRE LA RELACIÓN A/C Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN	167
TABLA 11.8	CANTIDAD MÁXIMA DE LA RELACIÓN AGUA CEMENTO PARA HORMIGÓN SOMETIDO A EXPOSICIÓN SEVERA.....	167
TABLA 11.9	VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO POR UNIDAD DE VOLUMEN DE HORMIGÓN	170
TABLA 11.10	PRIMERA ESTIMACIÓN DEL PESO DEL HORMIGÓN FRESCO	170
TABLA 11.11	VALORES ORIENTATIVOS MÁXIMOS DE LA RELACIÓN A/C EN FUNCIÓN DE LA.....	176
TABLA 11.12	MÁXIMA RELACIÓN A/C Y MÍNIMO CONTENIDO DE CEMENTO EN KG/M ³ EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES.....	176
TABLA 11.13	MÓDULO DE FINURA DE ÁRIDOS QUE SIGUEN LA PARÁBOLA DE FULLER	177
TABLA 11.14	VALORES ÓPTIMOS DEL MÓDULO DE FINURA SEGÚN ABRAMS PARA HORMIGONES ORDINARIOS.	177
TABLA 11.15	LITROS DE AGUA POR METRO CÚBICO*	178
TABLA 11.16	VALORES DE LA RELACIÓN GRAVA/ARENA G_2/G_1	179
TABLA 11.17	DOSIFICACIÓN PARA MEZCLAS EN TRABAJOS PEQUEÑOS	188

ENSAYOS

TABLA 12.1.	CONSISTENCIAS UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN, RELACIÓN ENTRE DIFERENTES ENSAYOS ..	194
TABLA 12.2.	REQUERIMIENTOS PARA EL MÉTODO DE COMPACTACIÓN	198
TABLA 12.3.	REQUISITOS PARA COMPACTACIÓN POR VARILLADO	198
TABLA 12.4.	REQUISITOS PARA COMPACTACIÓN POR VIBRADO	199
TABLA 12.5.	COEFICIENTES DE CONVERSIÓN RESPECTO AL ENSAYO A COMPRESIÓN EN PROBETA CILÍNDRICA DE 15 X 30 CM	205
TABLA 12.6.	COEFICIENTES DE CONVERSIÓN RESPECTO AL ENSAYO A HENDIMIENTO EN PROBETA 15 X 30 CM.	205
TABLA 12.7.	VALORES DE LA RELACIÓN F_{CJ}/F_{C28}	206
TABLA 12.8.	COEFICIENTES DE CONVERSIÓN RESPECTO A 28 DÍAS DE EDAD, EN LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A TRACCIÓN	206
TABLA 12.9.	PROCEDIMIENTOS PARA ESTIMAR LA CALIDAD DEL HORMIGÓN DE UNA ESTRUCTURA	214

PUESTA EN OBRA

ENCOFRADOS

TABLA 13.1	ALGUNOS MATERIALES PARA ENCOFRADO	224
TABLA 13.2	NÚMERO ACUMULATIVO DE DÍAS U HORAS PARA EL DESENCOFRADO [£]	230

FABRICACION Y TRANSPORTE

TABLA 14.1	TOLERANCIAS EN LA MEDICIÓN DE LOS MATERIALES SEGÚN LA NB 604	233
TABLA 14.2	COMPROBACIÓN DE LA HOMOGENEIDAD DEL HORMIGÓN	235
TABLA 14.3	PENDIENTES MÁXIMAS DE EQUIPOS INCLINADOS *	239

COLOCACION

TABLA 15.1	SOLDADURAS RECOMENDADAS, SEGÚN EL DIÁMETRO, POR LA ANSI/AWS D1.4	248
TABLA 15.2	ALTURA MÁXIMA DE CAÍDA DEL HORMIGÓN SEGÚN LA NORMA BOLIVIANA	251
TABLA 15.3	SISTEMAS DE TRANSPORTE DEL HORMIGÓN EN FUNCIÓN A SU CONSISTENCIA	253

COMPACTACION

TABLA 16.1	CONSISTENCIAS Y FORMAS DE COMPACTACIÓN (HORMIGÓN SIN ADITIVOS)	261
TABLA 16.2	RANGOS DE CARACTERÍSTICAS, DESEMPEÑO, Y APLICACIONES DE VIBRADORES INTERNOS*	267

JUNTAS

TABLA 17.1	ESPACIAMIENTO PARA LAS JUNTAS DE CONTRACCIÓN	277
TABLA 17.2	ESPACIAMIENTO PARA LAS JUNTAS DE EXPANSIÓN	282
TABLA 17.3	TIPOS DE WATERSTOPS Y SUS APLICACIONES	289

CURADO

TABLA 18.1	MEDIDAS PARA EL CURADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA EXTERNA	302
------------	---	-----

HORMIGONADO EN TIEMPO FRIO Y CALIENTE

TABLA 19.1	TEMPERATURAS RECOMENDADAS PARA EL HORMIGÓN	309
TABLA 19.2	TIEMPO DE PROTECCIÓN REQUERIDA PARA PREVENIR DAÑOS POR CONGELACIÓN EN LOS PRIMEROS DÍAS, EN HORMIGÓN CON AIRE INCLUIDO	311
TABLA 19.3	TIEMPO DE PROTECCIÓN PARA HORMIGÓN VACIADO DURANTE TIEMPO FRÍO	311
TABLA 19.4	MÁXIMA CAÍDA DE LA TEMPERATURA DURANTE LAS PRIMERAS 24 HRS. DESPUÉS DEL FINAL DEL PERIODO DE PROTECCIÓN	312
TABLA 19.5	DURACIÓN DEL TIEMPO DE PROTECCIÓN PARA UN PORCENTAJE DE LA RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS	312

HORMIGONES ESPECIALES

TABLA 20.1	AGREGADOS PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PESADO	318
------------	--	-----

CONTROL DE CALIDAD

TABLA 21.1	LÍMITES MÁXIMOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LOS LOTES DE CONTROL	326
TABLA 21.2	VALORES DE KN	327
TABLA 21.3	TAMAÑO DEL LOTE SEGÚN EL TIPO DE OBRA	333

NOTACIÓN

A = peso en el aire de muestra de agregado secada al horno.

A = Contenido de aire en porcentaje

A/C relación agua/cemento

B = peso en el aire de muestra de agregado saturada-seca en la superficie.

C [gr] = peso en el agua de muestra saturada.

C_M = Cemento requerido, Kg/m^3

d = abertura (diámetro) de cada tamiz.

D = tamaño máximo (diámetro) del árido

D = tamaño máximo (diámetro) del árido.

d = diámetro, mm

d_f = La mayor dimensión de cada grano

E = Módulo De Elasticidad

f_y límite de fluencia del acero

$f_{ct,k}$ resistencia a la tracción

f_{ck} Resistencia característica de proyecto ó Resistencia especificada,

f'_c Resistencia Especificada,

f'_{cr} ; f_{cm} Resistencia promedio requerida (

f_{ti} = resistencia a la tracción indirecta, MPa

G_s gravedad específica

G_a = Gravedad específica de agregado grueso y fino combinados.

G_c = Gravedad específica del cemento (por lo general 3.15 en cementos estándar y entre 2.85 y 3 para cementos puzolánicos)

l = longitud, mm

L = longitud de la estructura

M = Peso unitario del agregado, Kg/ m^3 ,

$M.F.$ = Módulo de Finura (M.F)

n = número de pruebas consecutivas de resistencia

p = porcentaje en peso que pasa por el tamiz.

P = carga máxima aplicada, indicada por la máquina de pruebas, N

s = desviación estándar, MPa.

U_M = Masa unitaria del hormigón fresco, Kg/m^3

V = Volumen del molde, m^3 . $V [\text{cm}^3]$ = Volumen del agregado

V_f = Volumen de cada grano

W = Peso del agregado, Kg.

W_M = Agua de mezclado requerida, Kg/m^3

α = Coeficiente de forma, *coeficiente de dilatación térmica*

X_f = pruebas individuales de resistencia, las cuales son un promedio de dos cilindros probados con el envejecimiento especificado de prueba, MPa.

\bar{X} = promedio de n resultados de pruebas de resistencia, MPa

$\tau_{0,01}$; $\tau_{0,1}$ y τ_1 de las tensiones en la barra de refuerzo que corresponden a deslizamientos de 0,01; 0,1 y 1 milímetros, respectivamente

\varnothing , Diámetro nominal

UNIDADES

De acuerdo al Sistema Internacional de Unidades "S.I.", en este texto se utilizan las siguientes unidades:

- Para **fuerzas**: **kN** (kilo newton)
- Para **densidad**: **kN/m³** (kilo newton por metro cúbico)
- Para **peso específico**: **kN/m³** (kilo newton por metro cúbico)
- Para **tensiones y resistencias**: **MPa** (mega pascales) = **N/mm²** (newton por milímetro cuadrado)

GLOSARIO

Acabado: Aspecto final que se da a la superficie de un hormigón o mortero por medio de un tratamiento adecuado.

Aire incluido: burbujas de aire intencionalmente incorporadas en el mortero o al Hormigón durante el mezclado; tienen un diámetro entre 10 y 1000µm(1mm) y son de forma esférica o casi esférica.

Aire ocluido: Cantidad de aire residual, propio de una mezcla después de su compactación. Se presenta en forma de burbujas de aire en el hormigón, que no han sido intencionalmente incorporadas y que son más grandes, por lo general de forma irregular, y de menor utilidad que aquellas de aire incluido; y de tamaño de 1 mm o mayor.

Amasada: Cantidad de mortero u hormigón preparado de una sola vez

Calor de hidratación: Cantidad de calor que fue producido durante los procesos de fraguado y endurecimiento, debido a las reacciones físico-químicas.

Cemento Hidráulico: Cemento que fragua y endurece por la interacción química con el agua, tanto al aire como bajo agua, a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables. Toron.- cable formado por varios hilos, generalmente 7, usado para el preesfuerzo de elementos de Hormigón.

Cemento Pórtland: Un cemento hidráulico producido por la pulverización del clinker del cemento Pórtland, usualmente en combinación con sulfato de calcio.

Compactación (consolidación): Proceso normal o mecánico, que tiende a reducir el volumen total de vacíos de una mezcla de mortero u hormigón fresco.

Condiciones de saturado con superficie seca: Condición según la cual cada partícula de árido, tiene sus poros llenos de agua, pero la superficie no presenta agua libre.

Conglomerante: Material capaz de unir partículas de materiales inertes y dar cohesión al conjunto, por efecto de transformaciones físico-químicas en su masa.

Consistencia: Grado de fluidez de una mezcla, determinado de acuerdo con un procedimiento estándar (ej. Cono de Abrams)

Contenido de aire: Diferencia entre el volumen de la mezcla y el volumen resultante de la suma de los volúmenes absolutos de los componentes.

Contenido de humedad: Cantidad de agua de un material, expresada como un porcentaje de su peso seco.

Curado: Proceso que consiste en controlar las condiciones ambientales del fraguado y/o endurecimiento del hormigón.

Diámetro Equivalente: De una barra corrugada, es el área que tendría una barra de la misma longitud y peso de sección constante (sin corrugaciones). Esta expresada en cm² y se calcula con la ecuación E 5.1.

Diámetro Nominal: Es la forma de designar una barra corrugada estándar, este se utiliza para la comercialización del acero, y para el diseño estructural. Es respecto a este que se establecen las tolerancias, se determina el área, perímetro, etc.

Dosificación: Proporción, en peso o en volumen, de los distintos materiales que integran una mezcla.

Durabilidad: Es la cualidad que poseen los hormigones de soportar las condiciones para las cuales fueron diseñados, sin sufrir deterioros durante su vida útil prevista.

Eflorescencia: Conversión espontánea en polvo, de diversas sales al perder el agua de cristalización, manifestada por manchas blanquecinas en la superficie del mortero u hormigón.

Escarificar: Acción de desprender la costra superficial del hormigón o del mortero, parcial o totalmente, por un procedimiento mecánico.

Esponjamiento: Es el aumento de volumen aparente de un volumen dado de arena, fenómeno que no se presenta en las gravas.

Exudación: Se produce cuando parte del agua del amasado tiende a subir hacia la superficie del hormigón ya colocado y compactado, debido a la sedimentación de los sólidos.

Fraguado: pérdida de elasticidad que sufre la pasta de cemento luego de haber sido hidratada. Condición alcanzada por el mortero, u hormigón cuando ha perdido plasticidad hasta un punto arbitrario, generalmente medido en términos de resistencia a la penetración o deformación.

Fraguado inicial: se refiere al primer endurecimiento de una pasta de cemento y agua; generalmente lo determina un valor empírico que indica el tiempo en Horas y minutos que se requiere para que una pasta de cemento endurezca lo suficiente para resistir hasta cierto grado, la penetración de una aguja. (ej. Aguja de Vicat)

Fraguado final: se refiere al punto donde la pasta logra un punto importante de rigidez, mayor al del fraguado inicial; generalmente lo determina un valor empírico que indica el tiempo en Horas y minutos que se requiere para que una pasta de cemento endurezca lo suficiente para resistir hasta cierto grado, la penetración de una aguja. (ej. Aguja de Vicat)

Falso fraguado: endurecimiento prematuro; El desarrollo rápido de rigidez en la pasta, mortero u hormigón recién mezclada de cemento Pórtland, sin la generación de mucho calor, en el cual la rigidez puede ser disipada y devolverle la plasticidad con un mayor mezclado sin añadir agua.

Gel de tobermorita: el aglutinante del hormigón curado en húmedo o a vapor a presión atmosférica; una especie de gel sólida rica en caliza.

Hormigón: Un material compuesto por varios materiales que consiste esencialmente de un medio aglutinante dentro del cual se encuentran partículas o fragmentos de agregado, por lo general una combinación de agregado fino y grueso; en el hormigón de cemento Pórtland, el aglutinante es una mezcla de cemento Pórtland y agua, con o sin aditivos.

Hormigonado: Operación que consiste en el llenado de los moldes (encofrado) con hormigón.

Juntas de aislamiento: Separación entre partes contiguas de una estructura de hormigón, usualmente en un plano vertical, diseñada para ubicarse en una zona donde tenga poca inferencia con el desempeño de la estructura, permitiendo un movimiento relativo en tres direcciones y evitando la formación de grietas en otras zonas del hormigón y a través de la cual todo o parte del refuerzo es interrumpido.

Juntas de construcción: Se entiende por juntas de construcción, a la unión que se debe realizar durante el hormigonado para mantener la continuidad monolítica de dos secciones contiguas cuando se ha producido una interrupción que supera el período plástico del hormigón.

Juntas de contracción: una ranura hecha mediante sierra, encofrado, o otros medios en una estructura de hormigón para crear un plano debilitado para regular la ubicación del agrietamiento resultante de los cambios dimensionales de las diferentes partes de la estructura.

Juntas de dilatación: 1. una separación proporcionada entre dos partes contiguas de una estructura para permitir el movimiento donde la expansión pueda exceder a la contracción.; o 2. una separación entre losas de pavimento, llenadas con un relleno compresible; o 3. una junta de aislamiento con la intención de permitir movimiento independiente entre dos partes contiguas.

Juntas frías: una junta o discontinuidad resultante de un retraso en el vaciado lo suficientemente largo para evitar la unión entre los materiales de dos capas sucesivas de hormigón o mortero.

Lechada de cemento: Mezcla de cemento y agua.

Pasta de cemento: Una mezcla plástica de cemento hidráulico y agua, tanto antes como después de haber fraguado.

Pérdida de revenimiento: Disminución del revenimiento, de una mezcla de concreto fresco, en un periodo de tiempo después de que el ensayo de revenimiento fue realizado. (Ej. Si una mezcla tenía inicialmente un revenimiento de 100mm y al cabo de 20min. tiene un revenimiento de 50mm, se dice que este hormigón tiene una pérdida de revenimiento de 2.5mm por cada minuto)

Peso unitario: Peso de una unidad de volumen de material, en las condiciones de compactación y humedad en que se lo determina.

Porosidad: Relación entre el volumen de los poros y el volumen aparente del cuerpo.

Refrentado: Material que se adiciona en el proceso de preparación de probetas destinadas al ensayo de compresión, para asegurar que sus bases sean lisas, planas y normales al eje principal, con el fin de obtener la mejor coincidencia posible con las piezas de apoyo y carga de la prensa de ensayo y una distribución uniforme de tensiones durante la aplicación de la carga.

Relación agua-cemento (A/C).- Es la relación entre la masa de agua, excluyendo la absorbida por los agregados, a la masa de cemento Pórtland en el hormigón, mortero, o lechada, tomada como decimal y abreviada a/c ó A/C.

Retracción: Las variaciones de volumen debido a la hidratación del cemento y a las variaciones de humedad se conocen con el nombre de retracción y puede presentarse mientras el hormigón está plástico y también cuando está endurecido.

Revenimiento (Asentamiento): Medida de la consistencia del concreto recién mezclado, que se expresa por el descenso de una masa representativa de la mezcla, desde el la altura original del cono hasta su asentamiento al quedar libre del soporte metálico en que fue moldeado.

Saturación Crítica: Condición que describe la cantidad de agua, que puede congelarse, que llena un poro en la pasta de cemento o en el agregado, que afectará la respuesta del concreto a la congelación. Se suele asumir como 91.7% de saturación por el 9% de incremento en el volumen en el paso del agua al estado sólido.

Segregación: Deshomogeneización de una mezcla fresca de morteros u hormigones. Tendencia del agregado grueso a separarse de la mezcla de concreto en el transporte o vaciado. Produce serias dificultades en la colocación y en la compactación, debido a lo cual las estructuras resultan defectuosas

Tensión máxima de rotura: Carga máxima por unidad de superficie, soportada por la probeta cuando se le aplica una carga de compresión, de dirección paralela a las fibras de la madera.

Tiempo de fraguado: Tiempo requerido por una mezcla fresca de cemento y agua de un cierto grado de consistencia, para pasar de un estado plástico a otro de cierta rigidez, determinado por un ensayo específico (ej. Aguja de Vicat).

Trabajabilidad: Mayor o menor facilidad que presenta un mortero u hormigón de ser mezclado, transportado y colocado.

INTRODUCCIÓN

Un buen diseño estructural con hormigón solo será útil si la ejecución física ha sido realizada con productos de buena calidad y con una buena practica por la mano de obra contratada. De los mismos factores dependerá el tiempo que una estructura se mantenga en buen estado.

El hormigón es un material que llega en a la obra en forma plástica, pudiendo ser moldeado en ella de prácticamente cualquier forma. Presenta una gran variedad de texturas y colores y se utiliza para construir muchos tipos de estructuras, puentes, túneles, represas, canales, grandes edificios, pistas de aterrizaje y en prácticamente lo que uno se pueda imaginar en cuanto a construcción se refiere.

El hormigón esta conformado por la mezcla en ciertas proporciones de cemento, agua, agregados y opcionalmente aditivos, que darán ciertas características al hormigón en función de sus características propias. En consecuencia, para poder dominar el uso de este material, se deben conocer no sólo las características del producto resultante, sino también la de los componentes.

El hormigón responde a las leyes físicas y químicas, por tanto, la explicación a sus diversos comportamientos siempre responde a alguna de estas leyes; y la no obtención de los resultados esperados se debe al desconocimiento de la manera como actúan estas en el hormigón, lo que resulta en una utilización artesanal del mismo. Una práctica sin un fuerte conocimiento tendrá consecuencias que no podemos predecir, dado que durante su empleo no se respetaran u obviarán las consideraciones técnicas que nos da el conocimiento científico sobre él.

LA TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN, CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

Es el campo de la Ingeniería Civil el que abarca el conjunto de conocimientos científicos orientados hacia la aplicación técnica, práctica y eficiente del hormigón en la construcción. En su desarrollo y utilización intervienen varias ciencias interrelacionadas, como son la Física, la Química, las Matemáticas y la investigación experimental.

En nuestro medio se ve una gran limitación en cuanto al control que un ingeniero puede tener sobre los materiales y la puesta en obra de un hormigón, debido principalmente, en el primer caso al poco interés que se parece tener en cuanto a respetar estrictamente las normas se refiere, y en el segundo caso debido a lo enraizadas que están algunas malas practicas, tanto en los obreros como en los ingenieros, que en estudios y publicaciones especializadas ya han sido desechadas por ser estas o bien inútiles para el fin que buscan o bien perjudiciales para el hormigón. Los ingredientes de un hormigón bueno y uno malo son en general los mismos siendo la forma en que son utilizados la única diferencia, por lo que no es una tarea simple el diseñar y producir hormigón de buena calidad.

Lo que nos queda por hacer es aprovechar el conocimiento científico acumulado a nivel mundial de casi un siglo sobre el hormigón y sus componentes, lo que nos provee de las herramientas para afrontar y solucionar, la mayoría de los problemas de la construcción moderna.

Uno de los objetivos de este texto es de auxiliar al constructor mediante la divulgación de normas técnicas sobre las especificaciones de estos productos y los cuidados principales exigidos en la manipulación de ellos, así como sobre la puesta en obra del hormigón. Siendo cada uno de estos, aspectos particulares a estudiar y controlar de modo que puedan trabajar eficientemente de manera conjunta en la aplicación práctica que deseamos.

La tecnología del hormigón es un tema que cada ingeniero debe conocer a fondo, y es por esto que en este texto se ha intentado hacer referencia a la mayor cantidad de información posible, adentrándonos en los aspectos imprescindibles y tratando de rozar los mayores posibles, dando siempre una referencia hacia otros textos disponibles y de fácil acceso en nuestro medio para que tanto el estudiante como el ingeniero boliviano pueda extender sus conocimientos y ser excelente en su práctica como constructor.

I

MATERIALES

PARA

EL HORMIGÓN

CAPITULO 1

CEMENTOS

1.1. BREVE HISTORIA DEL CEMENTO

Desde los tiempos de la antigua Grecia y Roma y hasta mediados del siglo XVIII se empleaba la cal como elemento fundamental y único aglomerante para las construcciones. Sin embargo ésta no posee la cualidad de fraguar bajo el agua cuando se hidrata, es decir, no es hidráulica. A estos morteros se les adicionaba en determinadas circunstancias materiales de origen volcánico o materiales de alfarería triturados, obteniéndose, experimentalmente, un mejor resultado de la resistencia química frente al agua natural y de un modo especial frente al agua de mar.

Por ejemplo el "cimento romano", se obtenía mezclando dos partes de puzolana y una parte de cal apagada. Las puzolanas procedían de las cenizas volcánicas (tobas) que se encontraban al pie del Vesubio en la región de Puzzole, de donde proviene el término puzolana.

De todos los cementos desarrollados, el cemento Pórtland, patentado en Inglaterra en 1824, es el que se emplea hoy en la mayoría de las estructuras de hormigón. Su nombre deriva de la semejanza en apariencia, en el estado endurecido, con la piedra Pórtland de Inglaterra.

1.2. DEFINICIONES

Cemento Hidráulico: Cemento que fragua y endurece por la interacción química con el agua, tanto al aire como bajo agua, a causa de las reacciones de hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables.

Cemento Pórtland: Un cemento hidráulico producido por la pulverización del clinker Pórtland, usualmente en combinación con sulfato de calcio.

1.3. PRODUCCIÓN

1.3.1. MATERIAS PRIMAS

El proceso de fabricación del cemento comienza con la obtención de las materias primas necesarias para conseguir la composición deseada para la producción del clinker.

Los componentes básicos para el cemento Pórtland son:

CaO, obtenida de *materiales ricos en cal, como la piedra caliza rica en CaCO_3* , con impurezas de SiO_2 , Al_2O_3 y MgCO_3 , de Margas, que son calizas acompañadas de sílice y productos arcillosos, *conchas marinas, arcilla calcárea, greda, etc.*

SiO_2 y Al_2O_3 , obtenidos de *Arcilla, arcilla esquistosa, pizarra, ceniza muy fina o arena* para proporcionar sílice y alúmina.

Fe_2O_3 , que se obtiene de *mineral de hierro, costras de laminado o algún material semejante* para suministrar el hierro o componente ferrífero.

Con los dos primeros componentes se produce cemento Pórtland blanco, el tercero es un material fundente que reduce la temperatura de calcinación necesaria para la producción del cemento gris. Esta disminución en la temperatura, hace que sea más económico en su fabricación, en relación al cemento blanco, aunque ambos poseen las mismas propiedades aglomerantes.

El número de materias primas requeridas en cualquier planta depende de la composición química de estos materiales y de los tipos de cemento que se produzcan. Para llevar a cabo una mezcla uniforme y adecuada, las materias primas se muestrean y analizan en forma continua, y se hacen ajustes a las proporciones mientras se realiza el mezclado.

1.3.2. EXTRACCIÓN

El proceso industrial comienza con la extracción de las materias primas necesarias para la fabricación del cemento, tales como piedra caliza, yeso, óxido de hierro y puzolana. La extracción se realiza en canteras a cielo abierto mediante perforaciones y voladuras controladas, para luego ser transportadas por palas y volquetas a la trituradora.

1.3.3. PROCESAMIENTO

1.3.3.1. TRITURACIÓN Y MOLIENDA

La finalidad de la trituración y posterior molienda es reducir el tamaño de las partículas de la materia prima, para que las reacciones químicas de cocción en el horno puedan realizarse de forma adecuada.

Trituración.- Después de la excavación, la primera operación de procesamiento es la trituración. Esta se realiza en dos etapas, primeramente la piedra bruta se pasa por la trituradora primaria, donde los fragmentos se reducen desde un tamaño de 1.5m a 15cm, y en seguida el producto triturado pasa a la trituradora secundaria, la cual lo reduce hasta un tamaño de alrededor de 1,5cm hasta alcanzar la granulometría deseada.

Los materiales son almacenados en tolvas de control, para pasar a la molienda, separados en sus cuatro componentes: piedra caliza chancada, arcilla desmenuzada, óxido de hierro y yeso chancado.

Molienda.- En esta etapa se seleccionan las características de la harina cruda que se desea obtener, mediante un sistema que consta de cuatro balanzas dosificadoras, que suministran los materiales que se incorporan al proceso del molino para lograr la mezcla final.

La molienda de materias primas (molienda de crudo) se realiza en equipos mecánicos rotatorios, en los que la mezcla dosificada de materias primas es sometida a impactos de cuerpos metálicos (molino de bolas Fuller en la planta de cemento “El Puente”) o a fuerzas de compresión elevadas (molino vertical Atox en la planta de cemento “Viacha”).

En la línea de transporte del polvo crudo se toman muestras representativas para controlar la composición química y la finura del producto. El polvo crudo es almacenado en silos.

Nota.- A partir de este punto en el proceso, los métodos aplicados divergen, en función de cómo se procesa el material antes de su entrada en el horno. Se distinguen cuatro tipos de proceso de fabricación: vía seca, vía semiseca, vía semihúmeda y vía húmeda. La tecnología que se aplica depende fundamentalmente del origen de las materias primas. Las empresas bolivianas, como SOBOCE S.A., COBOCE, FANCESA, etc., utilizan el proceso por vía seca. Por lo tanto solo se explicara este proceso.

1.3.3.2. PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL CLINKER (VÍA SECA)

CALCINACIÓN

Se usa un molino vertical de rodillos, para secar y reducir el material hasta que de 80 a 90% de este pase por el tamiz N°200. A medida que el material es forzado hacia la corriente de gas caliente proveniente del horno, produciéndose la deshidratación y la descarbonatación.

El material procesado en el horno rotatorio alcanza una temperatura entorno a los 1450°C. La materia prima, durante su calcinación, sufre reacciones químicas formándose granos duros, del tamaño de una nuez, de un nuevo material llamado **Clinker**. El Clinker que se forma sale del horno a esta temperatura, y entra dentro del enfriador donde es enfriado hasta una temperatura de 80°C en enfriadores de parrillas (“Viacha”) o rotativo (“El Puente”).

Posteriormente, luego de pasar por una chancadora, el clinker es transportado a un parque de almacenamiento para su tratamiento en el siguiente proceso. Desde este depósito y mediante un proceso de extracción controlada, el clinker es conducido al área de molienda.

En función de la composición, la resistencia y otras características adicionales, el cemento se clasifica en distintos tipos. Mediante balanzas automáticas denominadas dosificadoras se adicionan los agregados requeridos según el tipo de cemento que se requiera fabricar.

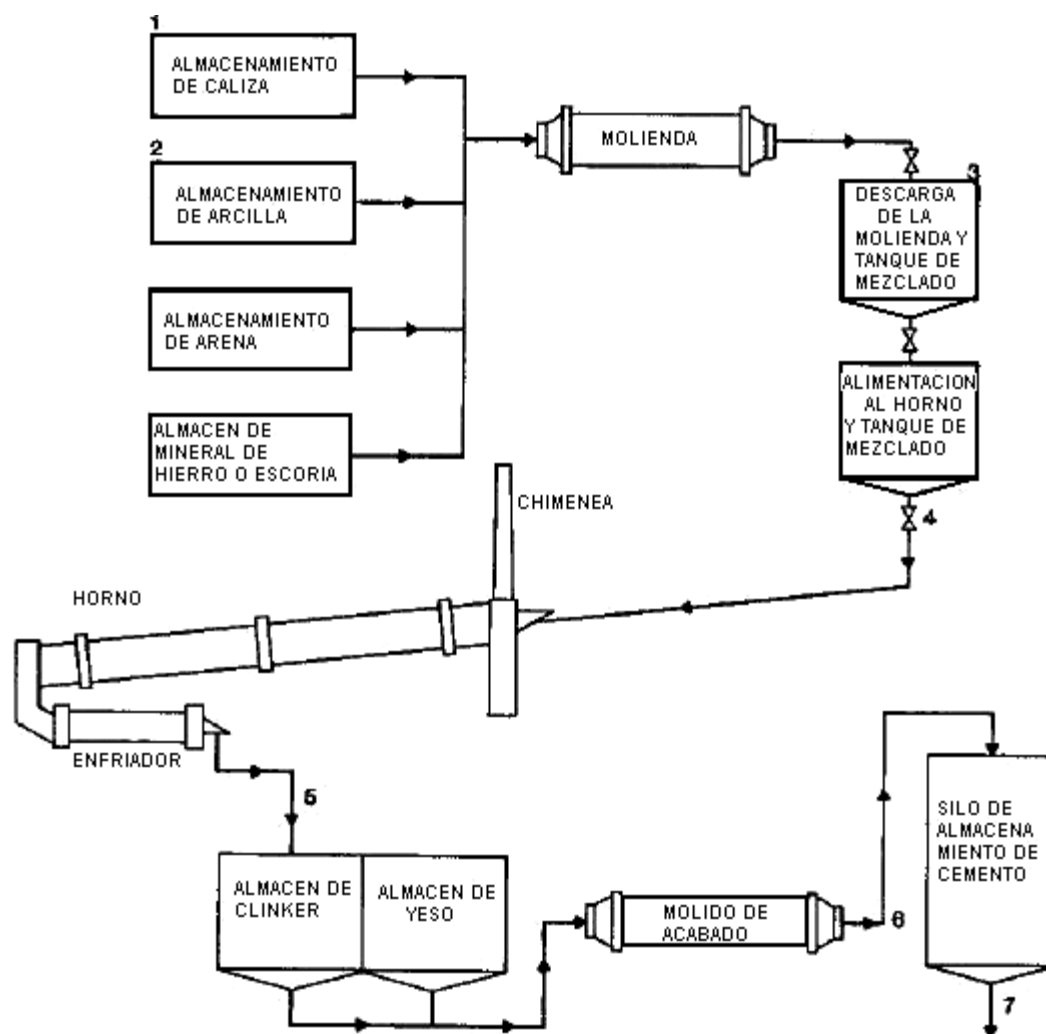


FIGURA 1.1 Esquema del proceso de fabricación del cemento Portland, mostrando los posibles puntos de control de calidad, en los cuales el productor extrae muestras.

Fuente: Referencia 6

1.3.3.3. MOLIDO DE ACABADO (MOLIENDA DE CEMENTO)

La molienda de cemento se realiza en equipos mecánicos en las que la mezcla de materiales es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas.

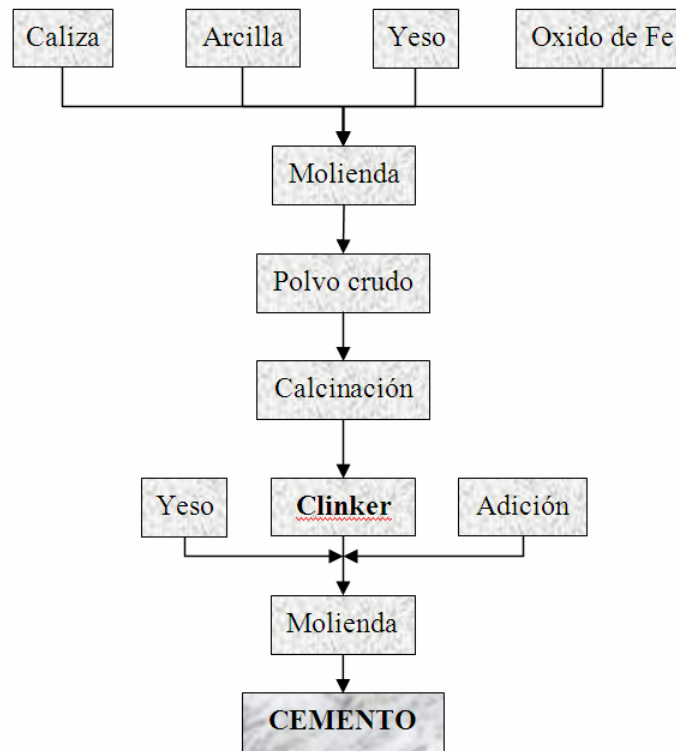
El clinker se muele junto con un 5 a 7% de yeso. La función de este último es de controlar el tiempo de fraguado y mejorar las características de resistencia y cambio de volumen.

1.3.3.4. SISTEMAS DE CONTROL

Se cuenta con un sistema de control de calidad permanente, mediante el análisis de muestras tomadas a lo largo de todo el proceso productivo, lo que permite contar con productos que están bajo especificaciones de la Norma Boliviana.

Para ello se cuenta en cada planta con laboratorios de ensayos físicos y químicos provistos de maquinaria y equipo adecuado y específico para realizar los ensayos establecidos por norma.

Proceso de Producción de Cemento



1.4. COMPOSICIÓN DEL CEMENTO

1.4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Análisis químico.-

La tabla 1.1 muestra los porcentajes típicos en que se presentan los compuestos en el cemento y las abreviaturas con las que suelen ser denominados:

TABLA 1.1 PORCENTAJES TÍPICOS DE INTERVENCIÓN DE LOS ÓXIDOS

	Oxido componente	Porcentaje Típico	Abreviatura
Cal combinada	CaO	62.5%	C
Sílice	SiO ₂	21%	S
Alúmina	Al ₂ O ₃	6.5%	A
Hierro	Fe ₂ O ₃	2.5%	F
Cal Libre	CaO	0%	
Azufre	SO ₃	2%	
Magnesio	MgO	2%	
Álcalis	Na ₂ O y K ₂ O	0.5%	
Perdida al Fuego	P.F.	2%	
Residuo insoluble	R.I.	1%	

Fuente: Propia en base a la referencia 10

Los cuatro primeros componentes nombrados en la tabla 1.1 no se encuentran libremente en el cemento, si no combinados formando los componentes potenciales, conocidos como “compuestos Bogue^a”

Los compuestos Bogue, sus fórmulas químicas y abreviaturas simbólicas son los siguientes:

Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$

Estos compuestos o “Fases”, como se les llama, no son compuestos verdaderos en el sentido químico; sin embargo, las proporciones calculadas de estos compuestos proporcionan información valiosa en la predicción de las propiedades del cemento. Las formulas utilizadas para calcular los compuestos Bogue se pueden encontrar en la ASTM C150.

1.4.2. EFECTO DE LOS COMPONENTES

Cada uno de los cuatro compuestos principales del cemento Pórtland, así como los compuestos secundarios, contribuye en el comportamiento del cemento, cuando pasa del estado plástico al endurecido después de la hidratación. El conocimiento del comportamiento de cada uno de los compuestos principales, durante la hidratación, permite ajustar las cantidades de cada uno durante la fabricación, para producir las propiedades deseadas en el cemento.

El Silicato Tricálcico, C_3S , es el compuesto activo por excelencia del clinker, es el que produce la alta resistencia inicial del cemento Pórtland hidratado. Pasa del fraguado inicial al final en unas cuantas horas. El C_3S reacciona con el agua desprendiendo una gran cantidad de calor (calor de hidratación). La rapidez de endurecimiento de la pasta de cemento está en relación directa con el calor de hidratación; cuanto más rápido sea el fraguado, mayor será la exotermia. El C_3S hidratado alcanza gran parte de su resistencia en siete días. Debe limitarse el contenido de C_3S en los cementos para obras de grandes masas de hormigón, no debiendo rebasarse un 35%, con objeto de evitar valores elevados del calor de hidratación.

El Silicato Dicálcico, C_2S , requiere algunos días para fraguar. Es el causante principal de la resistencia posterior de la pasta de cemento Pórtland. Debido a que su reacción de hidratación avanza con lentitud, genera un bajo calor de hidratación. Este compuesto en el cemento Pórtland desarrolla menores resistencias que el C_3S en las primeras edades; sin embargo, aumenta gradualmente, alcanzando a unos tres meses una resistencia similar a la del C_3S . Los cementos con alto contenido en silicato dicálcico son más resistentes a los sulfatos.

^a Bogue fue el primero en identificar los 4 componentes.

Aluminato Tricálcico, C_3A , presenta fraguado instantáneo al ser hidratado y gran retracción. Es el causante primario del fraguado inicial del cemento Pórtland y desprende grandes cantidades de calor durante la hidratación. El yeso, agregado al cemento durante el proceso de fabricación, en la trituración o en la molienda, se combina con el C_3A para controlar el tiempo de fraguado, por su acción al retardar la hidratación de este. El compuesto C_3A muestra poco aumento en la resistencia después de un día. Aunque el C_3A hidratado, por si solo, produce una resistencia muy baja, su presencia en el cemento Pórtland hidratado produce otros efectos importantes. Por ejemplo un aumento en la cantidad de C_3A en el cemento Pórtland ocasiona un fraguado más rápido, pero conduce a propiedades indeseables del hormigón, como una mala resistencia a los sulfatos y un mayor cambio de volumen. Su estabilidad química es buena frente a ciertas aguas agresivas (de mar, por ejemplo) y muy débil frente a sulfatos. Con objeto de frenar la rápida reacción del aluminato tricálcico con el agua y regular el tiempo de fraguado del cemento, se añade al clinker un sulfato (piedra de yeso).

El Ferroaluminato Tetracálcico, C_4AF , El uso de más óxido de hierro en la alimentación del horno ayuda a disminuir el C_3A , pero lleva a la formación de C_4AF , un producto que actúa como relleno con poca o ninguna resistencia. No obstante, es necesario como fundente para bajar la temperatura de formación del clinker. Es semejante al C_3A , porque se hidrata con rapidez y sólo desarrolla baja resistencia. No obstante, al contrario del C_3A , no muestra fraguado instantáneo. Su resistencia a las aguas selenitosas y agresivos en general es la mas alta de todos los constituyentes. Su color oscuro le hace prohibitivo para los cementos blancos por lo que en este caso se utilizan otros fundentes en la fabricación.

La Cal libre, CaO , No debe sobrepasar el 2%, ya que en cantidades excesivas puede dar por resultado una calcinación insuficiente del clinker en el horno, esto puede provocar expansión y desintegración del hormigón. Inversamente, cantidades muy bajas de cal libre reducen la eficiencia en el consumo de combustible y producen un clinker duro para moler que reacciona con mayor lentitud.

El Óxido de Magnesio queda limitado por las especificaciones al 6%, ya que conduce a una expansión de volumen variable en el hormigón, debido a la hidratación retardada, en especial en un medio ambiente húmedo.

Los Álcalis (Na_2O y K_2O) son componentes secundarios importantes, ya que pueden causar deterioro expansivo cuando se usan tipos reactivos de agregados silíceos para el hormigón. Se especifica cemento de bajo álcali en zonas en donde se encuentran estos agregados. El cemento de bajo álcali contiene no más del 0,6% de álcalis totales. Sin embargo, debe controlarse el porcentaje de álcalis totales en el hormigón, ya que el álcali puede entrar a la mezcla de ese hormigón proveniente de ingredientes que no son el cemento, como el agua, los agregados y los aditivos.

Trióxido de azufre, SO_3 , el azufre proviene de la adición de piedra de yeso que se hace al clinker durante la molienda para regular su fraguado, pudiendo también provenir del combustible empleado en el horno. Un exceso de SO_3 puede conducir al fenómeno de falso fraguado, por lo que conviene limitarlo a no más del 4%.

Perdida al fuego, cuando su valor es apreciable, la pérdida al fuego proviene de la presencia de adiciones de naturaleza caliza o similar, lo cual no suele ser conveniente. Si el cemento ha experimentado un prolongado almacenamiento, la pérdida al fuego puede provenir del vapor de agua o del CO_2 presentes en el conglomerante, siendo entonces expresiva de una meteorización del cemento.

Residuo insoluble, proviene de la presencia de adiciones de naturaleza silicea. No debe superar el 5% para el Pórtland I.

1.5. HIDRATACIÓN DEL CEMENTO

Cuando se agrega agua al cemento Pórtland, los compuestos básicos presentes se transforman en nuevos compuestos por reacciones químicas. Como por ejemplo:

Silicato tricálcico + agua \rightarrow gel de tobermorita + hidróxido de calcio

Silicato dicálcico + agua \rightarrow gel de tobermorita + hidróxido de calcio

Ferroaluminato tetracálcico + agua + hidróxido de calcio \rightarrow hidrato de calcio

Aluminato tricálcico + agua + hidróxido de calcio \rightarrow hidrato de Aluminato tricálcico

Aluminato tricálcico + agua + yeso \rightarrow sulfoaluminatos de calcio

- Las dos primeras reacciones, donde intervienen los silicatos de calcio, que constituyen alrededor del 75% por peso del cemento Pórtland, reaccionan con el agua para producir dos nuevos compuestos: gel de tobermorita el cual es no-cristalino e hidróxido de calcio que es cristalino. En la pasta de cemento completamente hidratada, el hidróxido de calcio constituye el 25% del peso y el gel de tobermorita, alrededor del 50%.
- La tercera y cuarta reacciones muestran como se combinan los otros dos compuestos principales del cemento Pórtland con el agua para formar productos de reacción.
- En la última reacción aparece el yeso, compuesto agregado al cemento Pórtland durante la trituración del clinker para controlar el fraguado.

Cada producto de la reacción de hidratación desempeña una función en el comportamiento mecánico de la pasta endurecida. El más importante de ellos es el compuesto llamado **gel de tobermorita**, el cual es el principal compuesto aglomerante de la pasta de cemento, porque liga o aglutina entre sí a

todos los componentes. Este gel es una sustancia dividida, muy fina, con estructura coherente, con una composición y estructura semejantes a la de un mineral natural, llamado tobermorita.

La rapidez de hidratación es afectada, además de la composición, por la finura del molido, la cantidad de agua agregada y las temperaturas de los componentes al momento de mezclarlos. Para lograr una hidratación más rápida, los cementos se trituran hasta dejarlos muy finos. El diámetro promedio de un grano de cemento Pórtland proveniente de la trituración del clinker es de alrededor de $10\ \mu m$. Las partículas del producto de hidratación, como el gel de tobermorita, son del orden de una milésima de ese tamaño, por lo que su enorme superficie específica, de alrededor de 3 millones de cm^2 por gramo, produce fuerzas de atracción entre las partículas. Estas fuerzas ocasionan que las partículas de gel de tobermorita se adhieran entre sí y con otras partículas introducidas en la pasta de cemento.

1.5.1. CALOR DE HIDRATACIÓN

La reacción del cemento con el agua es exotérmica; es decir, se genera calor en la reacción, durante la hidratación del cemento.

Se puede sacar ventaja de esta propiedad, durante el tiempo frío, para mantener temperaturas adecuadas de curado mediante el aislamiento que brinda el encofrado. No obstante, para las cortinas de presas y otras estructuras de hormigón masivo, deben tomarse medidas para reducir o eliminar el calor mediante el diseño y métodos de construcción adecuados, esto puede comprender la circulación de agua fría u otros medios de enfriamiento. Otro método para controlar el desprendimiento de calor es reducir el porcentaje de compuestos que generan elevado calor de hidratación, como el C_3A y el C_3S , y usar un cemento con menos finura.

El uso de agregado grande ($\leq 15cm$) también ayuda a reducir el requisito del cemento y el calor consecuente, al reducir la cantidad de agua, y por tanto menos cemento, con la misma relación agua/cemento.

A continuación se dan los valores para la cantidad total de calor desprendido durante la hidratación completa del cemento:

Silicato tricálcico	120 cal/gr	Ferroaluminato tetracálcico	100 cal/gr
Silicato dicálcico	62 cal/gr	Cal Libre	279 cal/gr
Aluminato tricálcico	207 cal/gr		

Si se considera que la cantidad de calor generada durante los primeros 7 días de hidratación para el cemento del Tipo I es el 100%, entonces:

Tipo II, moderadamente resistente al sulfato	85-94%
Tipo II. calor moderado de hidratación	75-85%
Tipo III, alta resistencia temprana	150%

Tipo IV, bajo calor de hidratación	40-60%
Tipo V, resistente al sulfato	60-90%

Los porcentajes son un poco mayores después de, más o menos, un año.

1.6. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL CEMENTO

1.6.1. FRAGUADO Y ENDURECIDO

El fraguado es la pérdida de plasticidad que sufre la pasta de cemento. La velocidad de fraguado viene limitado por las normas estableciendo un periodo de tiempo, a partir del amasado, dentro del cual debe producirse el principio y fin del fraguado. Este proceso es controlado por medio del ensayo de la aguja de Vicat (NB 063; ASTM C191), (Figura. 1.4 y 1.5), que mide el inicio y fin del fraguado en mediciones de penetraciones cada 15min, de la siguiente manera:

Inicio del Fraguado.- Cuando la aguja no penetra más de 25 mm en la pasta. Se recomienda que una vez iniciado el fraguado el cemento ya debe estar totalmente colocado y no debe moverse de su lugar, ya que se originaran fisuras.

Fin del Fraguado.- Cuando la aguja no deja marcas e la superficie de la pasta.



FIGURA 1.2 Ensayo para la determinación del tiempo de fraguado mediante la Aguja de Vicat
(Laboratorio de la Planta de Cemento COBOCE en Irpa Irpa, Cochabamba)
Fuente: Propia

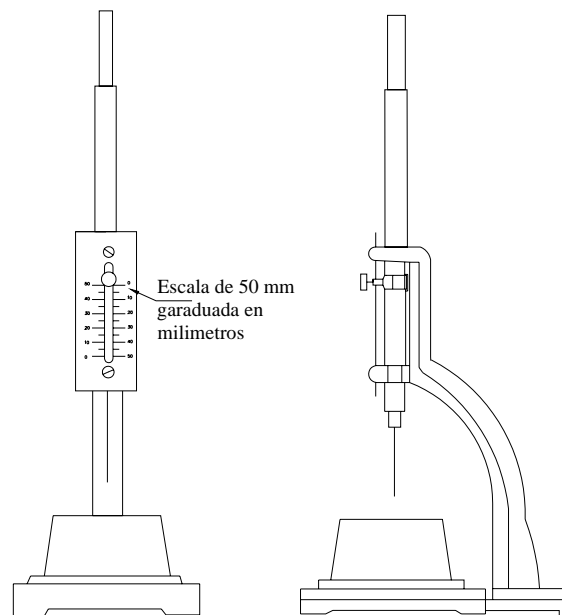


FIGURA 1.3 Aparato de Vicat

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 2

Como resultado del ensayo puede dibujarse un diagrama mostrando las mediciones en la escala graduada del aparato de Vicat, como se muestra en la figura 1.4:

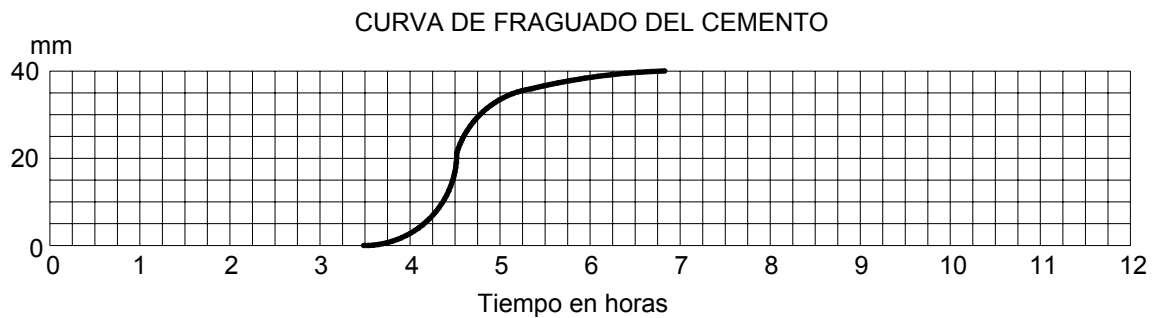


FIGURA 1.4 Curva de fraguado de un cemento

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 10

Otro ensayo que establece el tiempo de fraguado del cemento es el de las agujas de Gillmore (ASTM C266).

Los parámetros dados por la Norma Boliviana y por la ASTM para el inicio y fin del fraguado se muestran en la tabla 1.2

Factores que influyen en el tiempo fraguado:

1. finura del cemento.- cuanto mayor sea la finura, menor será el tiempo de fraguado.
2. temperatura.- a mayor temperatura, menor tiempo de fraguado
3. meteorización.- causado por el almacenamiento prolongado, aumenta la duración del tiempo de fraguado
4. materia orgánica.- que puede provenir del agua o de la arena, retrasa el fraguado y puede llegar a inhibirlo.
5. agua de amasado.- a menor cantidad corresponde un fraguado mas corto.
6. humedad ambiente.- a menor humedad menor tiempo de fraguado.

En casos donde el Hormigón debe ser trasladado una distancia considerable, se debe tomar en cuenta el tiempo de inicio del fraguado, debiéndose considerar el empleo de retardadores de fraguado.

Falso Fraguado o endurecimiento prematuro.- Se manifiesta por un endurecimiento rápido del hormigón poco después del mezclado. Si este es resultado de la deshidratación del yeso durante el proceso de molido, por lo general desaparecerá con un mezclado adicional. Si es resultado de la interacción cemento-aditivo, es posible que se requieran agua y mezclado adicionales para mitigar el problema.

Fraguado por compactación.- En ocasiones, en el manejo del cemento a granel, se encuentra que el cemento presenta cierta dificultad para fluir o que fluye mal. Este “fraguado por compactación”, no tiene efecto sobre las propiedades del cemento para producir el hormigón. El problema suele ser la humedad, instalaciones de manejo inadecuadamente diseñadas o haber dejado que el cemento se asentara, por demasiado tiempo sin moverlo.

El fraguado por compactación puede presentarse en donde, durante el tránsito, la vibración ha eliminado la mayor parte del aire que rodea las partículas de cemento, como en los vagones de ferrocarril. Se puede tener una situación semejante en los silos de almacenamiento. Por lo general, la aplicación de chorros de aire esponjará bastante el cemento como para permitir que fluya.

El uso de sustancias para ayudar a la pulverización del cemento ha reducido de manera significativa los problemas de flujo. Los sistemas modernos de aireación, los vibradores adecuados para los depósitos y los depósitos y silos correctamente diseñados experimentan pocos problemas, en caso de haberlos.

1.6.2. FINURA.

Influye decisivamente en la velocidad de reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado y el principio de este. Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento solo se hidratan en una profundidad de 0,01 [mm], por lo que si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño, al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte, como se ilustra en la figura 1.5.

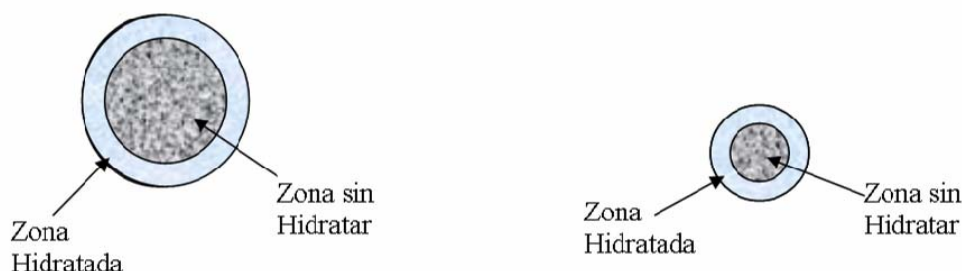


FIGURA 1.5 Hidratación de los granos de cemento en función a la finura

Fuente: Elaboración Propia

Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de hidratación serán muy altos, se vuelve más susceptible a la meteorización y disminuye su resistencia a las aguas agresivas, lo que en general resulta muy perjudicial.

La finura influye sobre las propiedades de ganancia de resistencia, en especial hasta un envejecimiento de 7 días. Por esta razón, el cemento del Tipo III se muele más fino que los otros tipos. Aun cuando las especificaciones (NB 011; ASTM C150) señalan una finura mínima (tabla 1.2), la mayor parte de los cementos sobrepasan este mínimo en entre un 20 y un 40%. Una señal práctica de que las partículas son muy pequeñas, es cuando durante el almacenamiento y manejo, una cantidad muy pequeña de humedad pre-hidrata el cemento.

Algunos usuarios especifican un mínimo de finura, en un esfuerzo por minimizar la contracción por secado del hormigón.

1.6.2.1. SUPERFICIE ESPECIFICA DEL CEMENTO

Las partículas de cemento, debido a su pequeño tamaño, no pueden caracterizarse por medio de tamices; de este modo, se necesitan otros métodos para medir el tamaño de partícula.

El método más común es el de **permeabilidad al aire de Blaine** (figura 1.6), (NB 472; ASTM C204). El ensayo consiste en medir el tiempo en que una columna de agua desciende una altura dada, como se ve en la figura 1.6 y 1.7. Este método depende del flujo de aire a través de un lecho de cemento preparado en la celda del aparato (permeabilímetro de Blaine, figura 1.7). El flujo de aire es función del tamaño y número de poros, lo cual es función del tamaño de partícula. Para determinar la superficie específica, se considera a las partículas como esferas.

El área superficial se expresa en m^2/kg o cm^2/gr de cemento. Los resultados dependerán de la temperatura a la que se haga el ensayo.



FIGURA 1.6 Permeabilímetro de Blaine
(Laboratorio de la Planta de Cemento COBOCE en Irpa
Irpa, Cochabamba)

Fuente: Propia

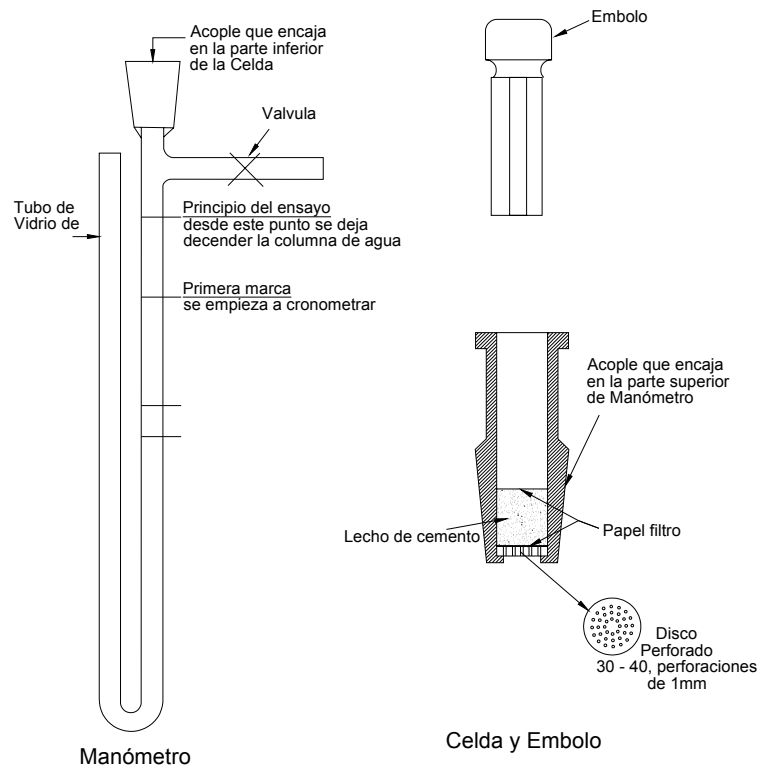


FIGURA 1.7 Detalle del Permeabilímetro de Blaine

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 3

El requisito mínimo de finura de la N.B. para el cemento Pórtland se muestra en la tabla 1.2.

TABLA 1.2 ESPECIFICACIONES FÍSICAS PARA LOS CEMENTOS SEGÚN LA NORMA BOLIVIANA Y LA ASTM

Categorías resistentes	Fraguado Inicial (minutos)	Fraguado Final (horas)	Superficie Específica Blaine (cm ² /g)
	NB 063		NB 472
Alta, Media	> 45	<10	>2600
Corriente	> 60	<12	>2600
Tipo de Cemento	ASTM C191		ASTM C204
Cemento Tipo I	> 45	<6,25	>2800

Fuente: Elaboración Propia en base a las Referencias 1 y 4

1.6.3. RESISTENCIA MECÁNICA.

La velocidad de endurecimiento del cemento depende de las propiedades químicas y físicas del propio cemento y de las condiciones de curado, como son la temperatura y la humedad. La relación agua/cemento (A/C) influye sobre el valor de la resistencia última, con base en el efecto del agua sobre la porosidad de la pasta. Una relación A/C elevada produce una pasta de alta porosidad y baja resistencia.

La resistencia es medida a los 3, 7 y 28 días, teniendo estas que cumplir los valores mínimos que se muestran en la tabla 1.3, dados por la Norma Boliviana y por la ASTM.

Para determinar la resistencia a la compresión, se realiza el ensayo de Compresión (NB 470; ASTM C109) (figura 1.8), en el cual se usan cubos de mortero de 5 cm por lado, con una relación constante agua/cemento de 0.485, y para los cementos con puzolana se calcula esta relación, según el contenido de puzolana, hasta lograr la consistencia especificada. El mortero para las pruebas consta de una parte de cemento y 2.75 partes de arena graduada estándar, mezclados con agua. Los cubos de mortero se preparan en moldes (figura 1.10) que se compactan en 2 capas con una varilla normalizada, se deja secar en una cámara con humedad mayor al 90%. Luego se desmolda y se coloca en agua saturada de Oxido de Calcio a una temperatura entre 23 a 25°C.

El ensayo se lleva a cabo en la maquina de compresión mostrada en la figura 1.9, donde se colocan los cubos y se les aplica presión, hasta la rotura.

TABLA 1.3 CATEGORÍAS DE RESISTENCIA DE LOS CEMENTOS

Categorías resistentes		Resistencias a la compresión* (MPa) (NB470)		
		Mínimas a 3 días	Mínimas a 7 días	Mínimas a 28 días
Alta	40	17	25	40
Media	30	-	17	30
Corriente	25	-	15	25
Tipo de Cemento		Resistencias a la compresión (MPa) (ASTM 109)		
Tipo I		12	19	-

* La mayoría de los cementos superan ampliamente los requisitos de resistencia de la especificación.

Fuente: Elaboración Propia en base a las Referencias 1 y 4



FIGURA 1.8 Probetas cúbicas enmoldadas
(Laboratorio de la Planta de Cemento COBOCE en Irpa Irpa, Cochabamba)

Los cubos son curados unas 24 horas en los moldes, luego son removidos de estos y son sumergidos en agua con cal hasta el momento de realizarse el ensayo

Fuente: Propia

1.6.4. EXPANSIÓN.

El exceso de cal libre o de magnesia en el cemento da por resultado expansión y la desintegración del hormigón hecho con ese cemento.

En el caso de la cal libre, se debe a partículas de esta que no llegan a combinarse con los demás componentes y que van aumentando de volumen hasta explotar.

En el caso de la magnesia se debe a la formación de la periclasa, formada por el óxido de magnesio que se origina cuando el clinker no ha sido enfriado rápidamente al salir del horno. La expansión producida por el magnesio se presenta a largo plazo, produciendo fisuras, por lo cual la Norma Boliviana limita la cantidad de óxido de magnesio al 6.0%.



FIGURA 1.9 Máquina para medir la resistencia a la compresión
(Laboratorio de la Planta de Cemento COBOCE en Irpa Irpa, Cochabamba)



FIGURA 1.10 Máquina mezcladora

Fuente: Propia

1.6.4.1. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA ESTABILIDAD DE VOLUMEN:

Ensayo en autoclave (NB 063; ASTM C151).- Se preparan briquetas de 2.5×2.5×25cm, y se mide su longitud inicial, luego se coloca al equipo de autoclave (figura 1.11), a una presión de 2MPa, una temperatura de 216°C y una humedad del 100%. Después de 3 hrs la briqueita se saca y se vuelve a medir (figura 1.12). La norma boliviana limita la expansión hasta un 0.8%.

Ensayo de las agujas de Le Chatelier (NB 643).- Consiste en un pequeño molde cilíndrico abierto por una generatriz y terminado por dos agujas para amplificar la expansión. Una vez relleno con la pasta de cemento, se mantiene 24hrs en la cámara húmeda. El aumento de la distancia de las dos puntas de las agujas después de sumergido el molde en agua en ebullición, durante 3hrs, mide la expansión.

En la tabla 1.4 se muestran los valores de expansión para los dos ensayos según la Norma Boliviana y la ASTM:

TABLA 1.4 VALORES DE EXPANSIÓN

Tipos	Expansión		
	Autoclave % máximo (NB471)	Autoclave % máximo (ASTM C151)	Le Chatelier mm máximo (NB 643)
I	0,80	0.80	10
IP, IF, P	1,00	-	10

Fuente: Elaboración Propia en base a las Referencias 1 y 4



FIGURA 1.11 Aparato de Autoclave



FIGURA 1.12 Medición Briqueita aparato de Autoclave

(Laboratorio de la Planta de Cemento COBOCE en Irpa Irpa, Cochabamba)

Fuente: Propia

1.6.5. FLUIDEZ

La fluidez es una medida de la consistencia de la pasta de cemento expresada en términos del incremento del diámetro de un espécimen moldeado por un medio cono, después de sacudir un número específico de veces.



FIGURA 1.13 Mesa de sacudidas. Ensayo de Fluidez
(Laboratorio de la Planta de Cemento COBOCE en Irpa Irpa, Cochabamba)
Fuente: Propia

debe dar 105 ± 5 .

El ensayo para determinar la fluidez (NB 473; ASTM C1437), se realiza en una mesa de sacudidas (figura 1.13) en la que se coloca la muestra en dos capas que son compactadas con una varilla normada en un molde normado. Se deja la muestra en el molde por 1min y luego se retira el molde quedando la muestra sobre el plato de la mesa de sacudidas. Se inicia una secuencia de 25 golpes y se realizan 5 medidas del diámetro de la muestra expandida por los golpes. La sumatoria de estas medidas

1.7. TIPOS DE CEMENTO PÓRTLAND

En el mundo existen una gran variedad de tipos de cementos, estos tipos se distinguen según los requisitos tanto químicos como físicos.

La norma ASTM especifica:

- 8 tipos de cemento Pórtland, ASTM C150: I, IA, II, IIA, III, IIIA, IV, V.
- 6 tipos de cemento hidráulico mezclado, ASTM C595: IS, IP, P, I(PM), I(SM), S.
 - Tipo IS.- Cemento Pórtland con escoria de alto horno
 - Tipo IP.- Cemento Pórtland con adición Puzolánica.
 - Tipo P.- Cemento Pórtland con puzolana para usos cuando no se requiere alta resistencia inicial.
 - Tipo I (PM).- Cemento Pórtland con Puzolana modificado.
 - Tipo I (SM).- Cemento portland con escoria, modificado.
 - Tipo S.- Cemento con escoria para la combinación con cemento Portland en la fabricación de concreto y en combinación con cal hidratada en la fabricación del mortero de albañilería.
- 3 tipos de cemento para mampostería, ASTM C91: N, M, S.

En Bolivia solo se fabrican los cementos del Tipo I, y IP por lo cual solo se desarrollaran estos con mayor detalle, del resto solo se presentaran sus características principales.

TIPO I, cemento común, para usos generales, es el que más se emplea para fines estructurales cuando no se requieren de las propiedades especiales especificadas para los otros cuatro tipos de cemento.

En las tablas 1.5 y 1.6 se dan diferentes características para los cementos Tipo I.

TABLA 1.5 COMPARACIÓN DE NORMAS INTERNACIONALES, PARA CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO PÓRTLAND TIPO I 40

ESPECIFICACIONES	Norma Boliviana NB 011	Norma Española UNE 80-301
Tipo	I	I
Categoría resistente	40	45
Composición		
clinker %	95-100	95-99
componentes adicionales %	0 a 5	1 a 5
Requerimientos Químicos		
Perdidas por calcinación, % Máx.	5,0	5,0
Residuo insoluble, % Máx.	3,0	5,0
Trióxido de azufre, % Máx.	3,5	4,5
Oxido de magnesio, % Máx.	6,0	-
Requerimientos Físicos		
Resistencia a la compresión, Mpa		
Mínima a los : 3 días	17,0	-
7 días	25,0	30,0
28 días	40,0	45,0
Fraguado Vicat		
Mínimo inicial, Minutos	45	60
Máximo final, Horas	10	12
Superficie específica mínima, cm ² /g	2600	-
Expansión		
Autoclave, % máximo	0,8	-
Le Chatelier, mm máx.	10	10

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 1.6 ESPECIFICACIONES QUÍMICAS PARA LOS CEMENTOS TIPO I

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (NB 061)	TIPO DE CEMENTO			
	I	IP	IF	P
Perdida por calcinación (% máx.)	5	7	7	8
Residuo insoluble (% máx.)	3	-	5	-
Trióxido de azufre (SO ₃) (% máx.)	3,5	4	4	4
Oxido de magnesio (MgO) (% máx.)	6	6	6	6
Puzolanidad 8 o 15 días	-	-	-	> 0

Fuente: Referencia 1

TIPO II, *cemento modificado para usos generales* y se emplea cuando se prevé una exposición moderada al ataque por sulfatos o cuando se requiere un moderado calor de hidratación. Estas características se logran al imponer limitaciones en el contenido de C_3A y C_3S del cemento. El cemento tipo II adquiere resistencia con más lentitud que el tipo I; pero a final de cuentas, alcanza la misma resistencia. Este tipo de cemento se usa en el hormigón expuesto al agua de mar.

TIPO III, *cemento de alta resistencia inicial*, recomendable cuando se necesita una resistencia temprana en una situación particular de construcción. Este cemento se obtiene por un molido más fino y un porcentaje más elevado de C_3A y C_3S . El hormigón tiene una resistencia a la compresión a los 3 días aproximadamente igual a la resistencia a la compresión a los 7 días para los tipos I y II y una resistencia a la compresión a los 7 días casi igual a la resistencia a la compresión a los 28 días para los tipos I y II. Sin embargo, la resistencia última es más o menos la misma o menor que la de los tipos I y II.

Dado que el cemento tipo III tiene un gran desprendimiento de calor, no se debe usar en hormigones masivos. Con un 15% de C_3A presenta una mala resistencia a los sulfatos. El contenido de C_3A puede limitarse al 8% para obtener una resistencia moderada a los sulfatos o a 5% cuando se requiere alta resistencia.

TIPO IV. *Cemento de bajo calor de hidratación*. Los porcentajes de C_2S y C_4AF son relativamente altos; El bajo calor de hidratación en el cemento tipo IV se logra limitando los compuestos que más influyen en la formación de calor por hidratación, o sea, C_3A y C_3S . Dado que estos compuestos también aportan la resistencia inicial de la mezcla de cemento, al limitarlos se tiene una mezcla que gana resistencia con lentitud. Este cemento se usa para estructuras de hormigón masivo, con bajas relaciones superficie/volumen. Requiere mucho más tiempo de curado que los otros tipos.

TIPO V. *cemento resistente a los sulfatos*. La resistencia al sulfato se logra minimizando el contenido de C_3A ($\leq 5\%$), pues este compuesto es el más susceptible al ataque por sulfatos.

Este tipo se usa en las estructuras expuestas a los sulfatos alcalinos del suelo o del agua, a los sulfatos de las aguas freáticas y para exposición al agua de mar.

Las resistencias relativas de los hormigones preparados con cada uno de los cinco tipos de cemento se comparan en la tabla 1.9, a cuatro edades diferentes; en cada edad, se han normalizado los valores de resistencia para comparación con el hormigón de cemento tipo I.

TABLA 1.7 CARACTERÍSTICAS DE LOS CEMENTOS PÓRTLAND*

Tipo*	Descripción	Características Opcionales
I	Uso General	1, 5
II	Uso general; calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos	1, 4, 5
III	Alta resistencia inicial	1, 2, 3, 5
IV	Bajo calor de hidratación	5
V	Alta resistencia a los sulfatos	5, 6
Características Opcionales 1. Aire incluido, IA, IIA, IIIA. 2. Resistencia moderada a los sulfatos: C_3A máximo, 8%. 3. Alta resistencia a los sulfatos: C_3A máximo, 5%. 4. Calor de hidratación moderado: calor máximo de 290 kJ/kg (70cal/g) a los 7 días, o la suma de C_3S y C_3A , máximo 58%. 5. Alkali bajo: máximo de 0.60%, expresado como Na_2O equivalente. 6. El límite de resistencia Alternativa de sulfatos esta basado en el ensayo de expansión de barras de mortero.		

(*) Para cementos especificados en la ASTM C 150.

Fuente: Referencia 6

TABLA 1.8 COMPOSICIÓN TÍPICA DE LOS COMPUESTOS DE LOS CEMENTOS PÓRTLAND

Tipo de cemento	Compuesto %						Perdida por Calcinación %	CaO Libre %
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	MgO	SO_3		
I	55	19	10	7	2.8	2.9	1	1
II	51	24	6	11	2.9	2.5	0.8	1
III	57	19	10	7	3	3.1	1	1.6
IV	28	49	4	12	1.8	1.9	0.9	0.8
V	38	43	4	9	1.9	1.8	0.9	0.8

Fuente: Referencia 8

TABLA 1.9 RESISTENCIAS DE LOS CEMENTOS TIPO I, II, III, IV Y V

Tipos de cemento Pórtland	Resistencia a la compresión [%]			
	3 días	7 días	28 días	3 meses
I. Usos generales	100	100	100	100
II. Modificado	85	89	96	100
III. Alta resistencia inicial	195	120	110	100
IV. Bajo calor	-	36	62	100
V. Resistente al sulfato	67	79	85	100

Fuente: Referencia 8

CON INCLUSIÓN DE AIRE, ASTM C150: TIPO IA, IIA Y IIIA,. Estos tipos tienen una composición semejante a las de los tipos I, II y III, excepto que durante la fabricación, se muele junto con estos últimos un agente inclusor de aire. Este constituye un mal método para obtener aire incluido, ya que no se puede hacer variar la dosis del agente para compensar otros factores que influyan en el contenido de aire en el hormigón.

Estos cementos se usan para la producción de hormigón expuesto a heladas severas.

CEMENTOS MEZCLADOS ASTM C595: TIPO IS, IP, P, I(PM), I(SM), S. Estos cementos consisten en mezclas, que se muelen juntas, de clinker y ceniza muy fina, puzolana natural o calcinada, o bien, escoria, dentro de los límites en porcentaje especificados de los componentes. También pueden consistir en mezclas de cal de escoria y cal de puzolana. En general, pero no necesariamente, estos cementos dan lugar a una resistencia mayor a la reacción álcali-agregado, al ataque por sulfato y al ataque del agua de mar, pero requieren un curado de mayor duración y tienden a ser menos resistentes a los daños por la sal para deshelar y descongelar. Dan lugar a una menor liberación de calor y es posible que ganen resistencia con mayor lentitud, en especial a bajas temperaturas.

Cementos Puzolánicos¹. Endurecen más lentamente, en especial en ambiente frío, y requieren en general más agua de amasado que el Pórtland normal; pero a largo plazo llegan a superar las resistencias de este, confiere al hormigón una elevada densidad, disminuyendo su porosidad y haciéndolo mas compacto, lo que aumenta su resistencia química. Todo ello lo hace recomendable para gran numero de obras (canales, pavimentos. obras en aguas muy puras o ambientes medianamente agresivos, hormigonados bajo agua, obras marítimas, etc.).

Cemento de Alto Horno.- Se obtiene por enfriamiento brusco en agua de la ganga fundida procedente de procesos siderúrgicos. Dado su contenido en cal combinada, la escoria no es una simple puzolana, sino que tiene de por si propiedades hidráulicas, es decir, que es un verdadero cemento, fragua y endurece muy lentamente, por lo que debe ser acelerada por la presencia de algo que libere cal, como el clinker de Pórtland.

Estos cementos presentan poca retracción y un débil calor de hidratación, por lo que pueden ser utilizados sin riesgo en grandes macizos. A cambio y por la misma razón, son muy sensibles a las bajas temperaturas, que retardan apreciablemente su endurecimiento, por lo que no deben utilizarse por debajo de los + 5 °C.

PARA MAMPOSTERÍA, ASTM C91, TIPO N, S Y M. Son cementos de baja resistencia utilizados exclusivamente en albañilería. El tipo M tiene la resistencia más alta, alcanzando 20MPa. Una característica de este tipo de cemento es su mayor plasticidad. Este tipo se usa también para revoque; asimismo, suele contener una piedra caliza finamente molida junto con el clinker y un plastificante inclusor de aire. Una marca que se encuentra en el mercado es CALCEMIT.

CEMENTO BLANCO. Este tipo cumple con los requisitos del tipo I o del tipo III, o los de ambos. En él se utilizan materias primas de bajo hierro y bajo manganeso y un apagado especial para producir un color blanco puro.

¹ Mayores detalles sobre la puzolana y su efecto en el cemento se describen en el apartado 4.5

API especial 10 para pozos petroleros. Este tipo consta de varias clases y está diseñado para satisfacer las condiciones de presión y temperatura elevadas que se encuentran en la inyección de *grout* en los pozos petroleros. Este tipo produce una pasta aguada de baja viscosidad y fraguado lento, tan líquida como es posible para facilitar el bombeo a presión en los pozos profundos. Es de bajo contenido de C_3A , de molido grueso y no puede contener alguna sustancia para ayudar a la pulverización.

TIPOS EXPANSIVOS. Estos tipos se usan para inhibir la contracción del hormigón y minimizar el agrietamiento. Tienen baja resistencia al sulfato.

CEMENTOS DE ALTA ALÚMINA. Este tipo contiene aluminatos de calcio, en lugar de silicatos de calcio. Tiene una elevada resistencia temprana (a las 24hrs) y propiedades refractarias. Puede experimentar un 40% de regresión en la resistencia después de secar durante un periodo de 6 meses, si el hormigón no se mantiene frío durante las primeras 24 h después de mezclar y vaciar.

1.8. SUMINISTRO Y ALMACENAMIENTO

Cada bolsa de cemento al ser suministrada debe llevar impreso en sus caras el tipo y clase de cemento, así como la marca comercial y las restricciones de empleo.

Para un adecuado manejo, posterior buen rendimiento del cemento, se recomienda observar las siguientes reglas:

- El almacenamiento de las bolsas de cemento se debe realizar en ambientes secos y ventilados, preferentemente en un depósito cerrado e impermeable.
- Apilar en pilas de no más de 10 bolsas y sobre madera a unos 10 cm del piso y separar las pilas de las paredes, evitando el contacto de la bolsa con estos, para que el cemento no absorba humedad,
- Apilarlas de modo de minimizar la circulación de aire entre ellas y cubrirlas con láminas de plástico resistente, protegiéndolas de corrientes de aire húmedo.
- Almacenar las bolsas de modo de ir utilizándolas en el mismo orden en que se las fue recibiendo.
- Si las bolsas son guardadas en almacenes cerrados y sobre tablones de madera la pérdida de resistencia probable en 3 meses es del 15% y en 6 meses del 25% aumentando sucesivamente, así como un aumento del tiempo de fraguado;
- Si el período de almacenamiento ha sido superior a un mes, se comprobará que las características del cemento continúan siendo adecuadas. Para ello, se realizarán los oportunos y previos ensayos de fraguado y resistencias mecánicas a tres y siete días, sobre

una muestra representativa del cemento almacenado, sin excluir los terrones que hayan podido formarse.

Una manera práctica de evaluar si ha habido hidratación parcial del cemento almacenado consiste en tamizar una muestra por el tamiz N°100, calculando el porcentaje retenido. Este % retenido, sin haber sufrido hidratación, oscila entre 0 y 0.5%.

Si el almacenamiento se realiza a granel, la conservación del cemento se efectúa fácil y correctamente en silos metálicos, estos pueden ser fijos, como los que poseen las plantas dosificadoras, o móviles (portátiles) (figura 1.14).



FIGURA 1.14 Silo Móvil

Fuente: www.potrail.com/espanol

1.9. CEMENTOS LOCALES

En nuestro país, el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA) regula la producción de los siguientes cementos, cuyas características químicas se muestran en la tabla 1.8 y sus componentes en la tabla 1.11:

- Cemento Pórtland.....Tipo I
- Cemento Pórtland con puzolana.....Tipo IP
- Cemento Pórtland con Filler Calizo.....Tipo IF

Entre las plantas de fabricación de cemento, que se encuentran en Bolivia encontramos las siguientes:

TABLA 1.10 MARCAS DE CEMENTO EN BOLIVIA Y LOS TIPOS DE CEMENTO PRODUCIDOS

	I 30	IP 30	I 40	IP 40
COBOCE	✓	✓	✓	✓
FANCESA	✓	✓	✓	✓
SOBOCE (Sociedad Boliviana de Cemento)				
VIACHA	✓	✓		✓
EMISA	✓	✓		✓
WARNES				✓
EL PUENTE	✓			

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 1.11 CLASIFICACIÓN Y COMPOSICIÓN DE LOS CEMENTOS SEGÚN LA NB 011

Tipos de cemento			Proporción en masa % ⁽¹⁾			
			Componentes principales			Componentes adicionales ⁽²⁾⁽³⁾
Denominación	Designación	Tipo	Clinker	Puzolana Natural	Filler Calizo ⁽³⁾	
Cemento Pórtland	Cemento Pórtland	I	95 a 100	—	—	0 a 5
	Cemento Pórtland con puzolana	IP	70 a 94	6 a 30	—	0 a 5
	Cemento Pórtland con filler calizo	IF	80 a 94	—	6 a 15	0 a 5
Cemento puzolánico		P	>60	40	—	0 a 5

(1) En estos valores se excluyen: el regulador de fraguado y los aditivos.

(2) Los componentes adicionales pueden ser uno o dos entre puzolana y filler calizo, a menos que sean componentes principales del cemento.

(3) La caliza a utilizarse como filler calizo o como componente adicional deberá cumplir el requisito de un contenido mínimo de 85% de carbonato cálcico.

Fuente: Referencia 1

En la tabla 1.12 se dará una descripción breve de los tipos de cemento producidos en la actualidad en nuestro medio, sus características de uso y sus limitaciones. Los cementos bolivianos están identificados como cemento Pórtland seguidos del Tipo y de la resistencia mínima medida en Mpa a los 28 días (ej. Cemento Pórtland IP-30).

En el anexo 6 se presentan tablas de ensayos físicos, mecánicos y químicos de varias marcas de nuestro medio.

TABLA 1.12 CARACTERÍSTICAS Y CRITERIOS DE EMPLEO DE LOS CEMENTOS PÓRTLAND

	Cemento tipo I 30	Cemento tipo I 40	Cementos puzolánicos IP 30- IP40
Características	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo calor de hidratación - Baja retracción. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia mecánica alta. - Endurecimiento rápido. 	<ul style="list-style-type: none"> - Hormigones mas trabajables, mas compactos, mas impermeables, y de mayor resistencia química. - bajo calor de hidratación - menor fisuración y retracción química
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia mecánica media. - Poca resistencia química 	<ul style="list-style-type: none"> - Poca resistencia química, 	<ul style="list-style-type: none"> - evolución de resistencia mas lenta, por lo que se aconseja dejar el apuntalado de los encofrados 10 días más de lo acostumbrado
Indicado para	<ul style="list-style-type: none"> - Hormigón armado. - Hormigón en masa de pequeño o mediano volumen. - Pavimentos y firmes de carreteras. - Estabilización de suelos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Hormigón armado. - Hormigón pretensado. - Prefabricación. 	<ul style="list-style-type: none"> - obras de hormigón en masa de grandes volúmenes - obras marítimas, vertederos industriales o sanitarios - obras en medios agresivos por aguas puras, carbónicas o con débil acidez - hormigones muy impermeables - Prefabricación.
No indicado para	<ul style="list-style-type: none"> - Obras en aguas, terrenos o ambientes agresivos. - Macizos de gran volumen, sobre todo en dosificaciones altas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Obras en aguas, terrenos o ambientes agresivos. - Piezas de hormigón armado de gran espesor. - Elementos o piezas fisurables por retracción. 	<ul style="list-style-type: none"> - hormigón en climas secos o fríos, - obras en ambientes muy agresivos - obras que requieren alta resistencia inicial
Precauciones	<ul style="list-style-type: none"> - Cuidar el almacenamiento. No debe prolongarse más de tres meses. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuidar el almacenamiento. No debe prolongarse más de dos meses. - Cuidar el amasado y, sobre todo, el curado. - Precauciones para evitar fisuración por retracción durante las primeras horas. 	<ul style="list-style-type: none"> - curar prolongadamente, sobretodo en climas secos y fríos - evitar desecación durante el prime periodo de endurecimiento en climas calidos y secos

Fuente: elaboración propia en base a la referencia 10

1.9.1. PLANTA DE FABRICACIÓN DE CEMENTO “COBOCE”

Dentro de la elaboración de este texto se realizo la visita a la planta de cemento “COBOCE”, en la que se pudieron constatar todos los proceso antes descritos, tanto productivos como de control de calidad. Por lo que se aprovecha de realizar una breve descripción de esta experiencia.

La planta de fabricación de cemento “COBOCE”, se encuentra ubicada en la localidad Irpa Irpa, provincia Capinota.

Las materias primas que utilizan son puzolanas naturales cuyos bancos de extracción se encuentran en Tarisa y principalmente en Tiraque. La piedra caliza es extraída de yacimientos cercanos a la

planta (19 km) y el mineral de Hierro (Hematina) es traída de Uspa-Uspa (camino a Santa Cruz).

Cuenta con la certificación de IBNORCA y desde el año 2000 cuentan con la certificación ISO 9002. Para conseguir estas certificaciones deben cumplir con la norma boliviana NB-011 del año 1995, que actualmente se encuentra en revisión.

La planta produce cementos del Tipo I y IP, pudiendo hacerse pequeñas modificaciones, manteniendo los rangos de la norma, para cumplir ciertos requisitos del comprador, como fue el caso del proyecto “Misicuni”, donde se modificaron las proporciones de los componentes para conseguir un tiempo de fraguado menor.

No existe mercado que demande la necesidad de producir otro tipo de cemento.

La planta, además de contar con los equipos necesarios para efectuar los ensayos ya descritos, cuenta con una máquina de rayos X para la determinación exacta y rápida de la composición química de la harina dentro de los molinos para hacer las correcciones en la dosificación de los componentes del clinker.

BIBLIOGRAFÍA

1. NB 011:1995 Cemento - Definiciones, Clasificación y Especificaciones.
2. ASTM C191-04 Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.
3. ASTM C204-00 Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus.
4. ASTM C150-04 Standard Specification for Portland Cement.
5. ASTM C151-00 Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement.
6. ACI 225R-99 Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements.
7. EHE (Instrucción de Hormigón Estructural) Artículo 26, Cementos, http://www.mfom.es/cph/norma_ehe.html.
8. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) “Manual de la Construcción con Concreto”. 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, México.
9. MERRITT F. S, LOFTIN M. K, RICKETTS J. T. (1999) “Manual del Ingeniero Civil”. 3ª ed. en español, Tomo I. McGraw_Hill, México.
10. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) “Hormigón Armado”. 14ª ed., Gustavo Pili, SA, Barcelona.
11. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association “Design and Control of Concrete Mixtures”. 14ª ed., www.portcement.org
12. <http://www.soboce.com>.
13. <http://www.fancesa.com>.
14. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

CAPITULO 2

AGREGADOS

2.1. INTRODUCCIÓN

Alrededor de las tres cuartas partes (75%) del volumen del hormigón convencional es ocupado por agregados que consisten en materiales como arena, grava, roca triturada o escoria siderúrgica. Es inevitable que un componente que ocupa un porcentaje tan grande de la masa contribuya con importantes propiedades tanto para el hormigón plástico (fresco) como para el endurecido; para este último la selección adecuada de las proporciones y tipo de agregado influye en propiedades como la estabilidad volumétrica, el peso unitario, la resistencia a un medio ambiente destructivo, las resistencias mecánicas, las propiedades térmicas y la textura superficial.

Además, para desarrollar hormigones de características especiales como ser poco peso, aislamiento térmico o blindaje contra la radiación, se emplean, según sea el caso, agregados livianos, pesados o fabricados específicamente para obtener estas propiedades.

La verificación permanente de la calidad de los agregados contribuye a mantener controlada la demanda de agua y la homogeneidad de las mezclas, favoreciendo inmediatamente a la uniformidad del proceso de producción y a propiedades de interés del hormigón.

2.2. AGREGADOS EN EL HORMIGÓN

Inicialmente se podría pensar que la función de los agregados en el Hormigón es la de reducir los costos, pero en realidad no se podría conseguir un buen hormigón si no se contara con estos. Por ejemplo la pasta sin agregados sufriría una cantidad intolerable de contracción que conduciría al agrietamiento, debido a la contracción diferencial entre las partes exteriores e interiores. La superficie del agregado proporciona una enorme área de contacto para producir una liga íntima con la pasta. La rigidez de los agregados restringe en gran parte el cambio de volumen de la masa en conjunto. En la figura 2.1 se muestra la magnitud de la contracción del hormigón con relación a la pasta, conforme se aumenta la cantidad de agregado en el propio hormigón, por ejemplo con un contenido de 75% de agregado la contracción del hormigón es sólo de alrededor de un décimo del correspondiente al que presentaría una pasta sin agregados.

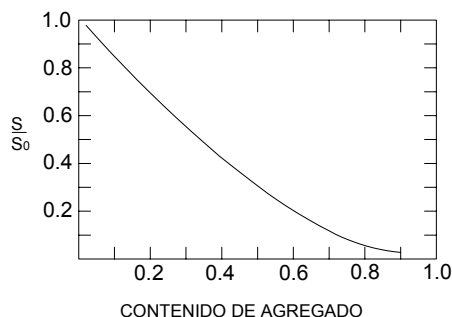


FIGURA 2.1 Relación de la contracción S del hormigón (cemento+agregado+agua) a la contracción S_0 de la pasta (cemento+agua) en función del porcentaje de agregado contenido en el hormigón.

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 6

En algunos casos, se emplean con éxito hormigón, que contienen poco o ningún agregado, como por ejemplo:

- En obras subterráneas en donde no se espera un secado severo (hormigón lanzado)
- En la inyección de *lechada* en los miembros preesforzados postensados, donde además se utilizan expansores para contrarrestar la contracción.

2.3. DEFINICIONES

La norma boliviana NB 594 define árido como “Material granular, generalmente inerte, resultante de la desintegración natural y desgaste de las rocas o que se obtiene mediante la trituración de ellas, de escorias siderúrgicas o de otros materiales suficientemente duros que permiten obtener partículas de forma y tamaño estables.”

2.3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA HORMIGÓN

La gran variedad de material granular que se incorpora en el hormigón hace que sea muy difícil la expresión de una definición por completo satisfactoria de “Agregado”. Por lo que aquí se dan varias definiciones según tres clasificaciones: por su procedencia, por su tamaño y por su gravedad específica.

2.3.1.1. POR SU PROCEDENCIA

- **Agregados naturales.-** Formados por procesos geológicos.
- **Agregados artificiales.-** Proviene de un proceso de transformación de los agregados naturales, dichos agregados artificiales son productos secundarios. Algunos de estos agregados son los que constituyen la escoria siderúrgica, la arcilla horneada, el hormigón reciclado, piedra triturada (chancada), etc.
 - **Piedra triturada.-** Producto que resulta de la trituración artificial de rocas, piedra boleada o pedruscos grandes, del cual todas las caras poseen aristas bien definidas, resultado de la operación de trituración.
 - **Escoria siderúrgica.-** Residuo mineral no metálico, que consta en esencia de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases, y que se produce simultáneamente con la obtención del hierro.

2.3.1.2. POR SU TAMAÑO

- **Agregado grueso.-** Agregado retenido de modo predominante por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm); o bien, aquella porción de un agregado que es retenida por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm).

El agregado grueso utilizado en nuestro medio es denominado “**Grava**”, que resulta de la desintegración y abrasión naturales de la roca o procede de la trituración de esta.

- **Agregado fino.-** Agregado que pasa por el tamiz de $\frac{3}{4}$ in (9.5 mm) y casi pasa por completo por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm). y es retenido de modo predominante por el tamiz No. 200 (de 75 μ m); o bien, aquella porción de un agregado que pasa por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm) y es retenida de modo predominante por el No. 200 (de 75 μ m).

El agregado fino utilizado en nuestro medio se denomina “**Arena**”, este resulta de la desintegración y abrasión naturales de la roca o procede de la trituración de esta.

2.3.1.3. POR SU GRAVEDAD ESPECIFICA

TABLA 2.1 VALORES PROMEDIO PARA LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS TIPOS PRINCIPALES DE ROCAS

Tipo De Roca	Gravedad específica	Absorción * %	Prueba de abrasión Los Angeles %
Ígneas			
Granito	2.65	0.3	38
Sienita	2.74	0.4	24
Diorita	2.9	0.3	-
Gabro	2.96	0.3	18
Peridotita	3.31	0.3	-
Felsita	2.66	0.8	18
Basalto	2.86	0.5	14
Diabasa	2.96	0.3	18
Sedimentarias			
Piedra caliza	2.66	0.9	26
Dolomita	2.7	1.1	25
Arcilla esquistosa	1.8 - 2.5	-	-
Arenisca	2.54	1.8	38
Chert	2.5	1.6	26
Conglomerado	2.68	1.2	-
Brecha	2.57	1.8	-
Metamórficas			
Gneis	2.74	0.3	45
Esquisto	2.85	0.4	38
Anfibolita	3.02	0.4	35
Pizarra	2.74	0.5	20
Cuarcita	2.69	0.3	28
Mármol	2.63	0.2	47
Serpentina	2.62	0.9	19

*Después de inmersión en agua a la temperatura y presión atmosféricas

Fuente: Referencia 6

- **Ligeros**, $G_s < 2.5$. Los agregados ligeros, como la arcilla esquistosa y la expandida, la escoria expandida, la Vermiculita, la Perlita, la Piedra Pómez y las Cenizas, se utilizan para producir hormigón aislante, para unidades de mampostería o estructural ligero que pesa entre 400 y 2000 kg/m³.
- **Normales**, $2.5 < G_s < 2.75$. Los materiales principales que se usan en el hormigón de peso normal, por lo común de 2300 a 2500 kg/m³, incluyen las arenas y gravas, roca triturada y escoria siderurgica. Las rocas trituradas de uso más común son el Granito, Basalto, Arenisca, Piedra Caliza y Cuarzita.
- **Pesados**, $G_s > 2.75$. Los agregados pesados, como la Magnetita, la Barita o el Hierro de desecho, se usan para producir hormigón de 2900 a 3500 kg/m³, utilizado para blindaje contra la radiación y para contrapesos de hormigón.

La tabla 2.1 da los valores promedio para las propiedades físicas de los tipos principales de rocas.

La EHE limita estos valores a:

TABLA 2.2 LIMITACIONES FÍSICO-MECÁNICAS SEGÚN LA EHE

Resistencia al desgaste de la grava determinada con el método de ensayo de Los Ángeles	≤ 40
Absorción de agua por los áridos	$\leq 5\%$

Fuente.: Referencia 5

2.4. BÚSQUEDA Y EXPLORACIÓN

Al considerarse los agregados como elementos fundamentales, es necesario analizar las propiedades físicas y ventajas que podrían brindar en la elaboración de hormigones, de acuerdo al banco de provisión del cual son extraídos.

La tabla 2.3 muestra un resumen de propiedades de diferentes tipos de rocas.

La exploración o búsqueda del material adecuado para usarse como agregado del hormigón puede tomar una o varias rutas, dependiendo de la cantidad de material necesario, la ubicación y del conocimiento ya adquirido o de la facilidad con la que puede procurarse.

Después de que se localiza una fuente potencial de agregado para hormigón, es necesario determinar si están presentes la calidad y tamaño deseados de agregados, o si estas características se pueden conseguir, de modo que se pueda calificar la operación como económicamente factible.

TABLA 2.3 RESUMEN DE PROPIEDADES DE INGENIERÍA DE LAS ROCAS

Tipo de Roca	Resistencia Mecánica	Durabilidad	Estabilidad Química	Características Superficiales	Presencia de Impurezas Indeseables	Forma Triturada
Ígneas						
Granito, Diorita, Sienita	buena	Buena	buena	buenas	posible	buena
Felsita	buena	Buena	cuestionable	regular	posible	regular
Basalto, Diabasa, Gabro	buena	buena	buena	buenas	rara	regular
Peridotita	buena	regular	cuestionable	buenas	posible	buena
Sedimentarias						
Piedra caliza, Dolomita	buena	regular	buena	buenas	posible	buena
Arenisca	regular	regular	buena	buenas	rara	buena
Chert	buena	mala	mala	regular	probable	mala
Conglomerado, Brecha	regular	regular	buena	buenas	rara	regular
Arcilla esquistosa	mala	mala	-	buenas	posible	Reg. a mala
Metamórficas						
Gneis, Esquistos	buena	buena	buena	buenas	rara	buena a mala
Cuarcita	buena	buena	buena	buenas	rara	regular
Mármol	regular	buena	buena	buenas	posible	buena
Serpentinita	regular	regular	buena	Reg. a malas	posible	regular
Anfibolita	buena	buena	buena	buenas	rara	regular
Pizarra	buena	buena	buena	buenas	rara	mala

Fuente: Referencia 6

2.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

La limpieza, sanidad, resistencia y forma de las partículas son importantes en cualquier agregado. Los agregados se consideran **limpios** si están exentos de exceso de arcilla, limo, mica, materia orgánica, sales químicas y granos recubiertos. Un agregado es **físicamente sano** si conserva su integridad bajo cambios de temperatura o humedad y si resiste la acción de la intemperie sin descomponerse.

Se realizan variadas pruebas en los agregados del hormigón para:

1. Establecer que se satisfagan requisitos mínimos de *calidad*; se incluyen esas cualidades básicas deseables como tenacidad, solidez y resistencia a la abrasión,
2. Determinar características útiles para seleccionar las proporciones para el hormigón; como la gravedad específica y la absorción.
3. Asegurar que en forma rutinaria se cumplan con los requisitos para el trabajo.

En la mayor parte de los casos, las pruebas aplicadas a los agregados dan un *índice* para predecir el comportamiento en el hormigón, en lugar de evaluar un atributo en verdad básico.

2.5.1. TEXTURA SUPERFICIAL

La textura superficial de los agregados afecta la calidad del hormigón en estado fresco y tiene gran influencia en las resistencias, repercutiendo más en la resistencia a la flexotracción que a la compresión.

El hormigón puede contener agregado con una gran diversidad de características superficiales distintas desde una muy lisa hasta muy áspera y de panal y resultar en un hormigón satisfactorio.

Mientras mayor sea la rugosidad superficial de los agregados mayor es la superficie de contacto con la pasta de cemento; haciendo necesaria la utilización de mayor contenido de pasta para lograr la trabajabilidad deseada, pero favorece la adherencia pasta-agregado y así mejora las resistencias. Esto es característico de los agregados de trituración.

En el caso de los cantos rodados, donde su superficie es lisa, dan mejor trabajabilidad al hormigón pero menor adherencia pasta-agregado.

2.5.2. FORMA DEL AGREGADO

La forma del agregado tiene gran influencia en las propiedades del hormigón fresco y endurecido, particularmente en lo que hace a la docilidad y resistencias mecánicas respectivamente.

Como en el caso de la textura superficial, se ha producido hormigón satisfactorio con agregado que consta de una gran diversidad de formas diferentes.

Las partículas naturales de agregado que han sido sujetas a la acción de las olas y el agua durante la historia geológica pueden ser esencialmente esféricas; las otras, rotas por la trituración, pueden ser cúbicas o tener muchos ángulos con vértices agudos, debiendo tener por lo menos una cara fracturada, resultante del proceso de trituración.

Un agregado grueso con muchos ángulos, que presentara un mayor número de vacíos, exigirá una mayor cantidad de arena para dar lugar a un hormigón trabajable, pero tendrá una mayor trabazón. Inversamente, el agregado grueso bien redondeado que tiende hacia las partículas esféricas requerirá menos arena y tendrá mayor trabajabilidad, pero tendrá una menor trabazón. No obstante, resulta interesante hacer notar que los hormigones producidos con una gran disparidad en las formas de las partículas, con un contenido dado de cemento por metro cúbico de hormigón, con frecuencia tendrán más o menos la misma resistencia a la compresión.

También se ha medido la forma y textura de las partículas del agregado fino, la investigación indica que la forma de la partícula y la textura superficial del agregado fino puede tener una influencia más importante sobre la resistencia del hormigón que la del agregado grueso.

Las formas delgadas y alargadas dan lugar a hormigones de peor calidad. Disminuyen la trabajabilidad del hormigón, obligando a una mayor cantidad de agua y arena, lo que en definitiva se traduce en una disminución de la resistencia. Además las formas planas tienden a orientarse en un plano horizontal, acumulando agua y aire debajo de ellas, lo que repercute desfavorablemente en la durabilidad de los hormigones. Por otra parte, aunque el tipo de material sea muy resistente, estas formas son frágiles y se pueden romper en el mezclado y la compactación del hormigón. Algunas especificaciones para el agregado grueso limitan la cantidad de partículas delgadas o alargadas a un máximo del 10 al 15% en peso, más o menos. Esas partículas se definen como aquéllas cuya relación de la dimensión más larga de un prisma rectangular y la dimensión menor sea mayor que 5.

Los agregados triturados resultan en hormigones con alta resistencia a la flexotracción, por lo que son preferidos para pavimentos en carreteras

No se ha probado que la forma de la partícula del agregado grueso en el hormigón sea un problema importante si se incrementa y se elige el contenido de modo que se haga una compensación en los agregados que tienden a producir mezclas ásperas, como las que pueden resultar al usar por completo agregado de piedra triturada o escoria siderúrgica.

La norma boliviana NB 596 prescribe que el coeficiente de forma, determinado según el método de ensayo indicado en la NB 610, no debe ser inferior a 0.15, (la EHE restringe este valor a 0.20). En caso de serlo, se deberán realizar ensayos de resistencia en laboratorio, antes de autorizar su uso.

2.5.2.1. COEFICIENTE DE FORMA (NB 610)

Se emplea en los áridos gruesos utilizados en la fabricación del hormigón, para evitar la presencia de áridos aciculares y/o laminares que dan lugar a bajas resistencias.

Se cuartea una muestra representativa del agregado, se realiza el tamizado por la serie de tamices establecidos en la norma, se toman por lo menos 20 granos de cada tamiz y se determina mediante la ecuación:

$$\alpha = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{\frac{\pi}{6}(d_1^3 + d_2^3 + \dots + d_n^3)}$$

Donde:

α = Coeficiente de forma

V_i = Volumen de cada grano

d_i = La mayor dimensión de cada grano, es decir, la distancia entre los dos planos paralelos y tangentes a ese grano que estén más alejados entre sí de entre todos los que sea posible trazar.

2.5.3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL

“No se puede producir hormigón de alta resistencia que contenga agregados estructuralmente débiles”.

Para que un agregado pueda considerarse de resistencia adecuada, debe sobrepasar la resistencia propia del aglomerante (cemento).

A pesar de la aparente relación obvia entre la resistencia del hormigón y la del agregado, al menos en los casos extremos, otros factores, como la forma de la partícula, textura superficial, gradación y relación A/C, se conjugan contra la evaluación precisa de la contribución de la resistencia estructural del propio agregado. Por esto no se ha podido hacer predicciones de la calidad del hormigón con relación a la resistencia de los agregados. En la tabla 2.4 se muestran las resistencias a la compresión de diversas rocas.

TABLA 2.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ROCAS DE USO COMÚN COMO AGREGADOS DEL HORMIGÓN

Tipo de roca	Nº de Muestras	Promedio (*)	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	
			Después de suprimir los extremos(**)	
			Máxima	Mínima
Granito	278	1895	2622	1167
Felsita	12	3294	5364	1223
Trapeana	59	2949	3846	2053
Piedra caliza	241	1701	2454	949
Arenisca	79	1448	2447	450
Mármol	34	1505	2489	520
Cuarcita	26	2788	4310	1266
Gneis	36	1677	2397	956
Esquisto	31	1979	3030	928

Para la mayor parte de las muestras, la resistencia a la compresión es un promedio de 3 a 15 muestras.

(*) Promedio de todas las muestras,

(**) De todas las muestras probadas, se han suprimido aquellas con los valores más altos o más bajos en 10% por considerarse como no típicas del material.

Fuente: Referencia 6

Se considera que las arenas provenientes de río son las de mejores características puesto que, en su mayoría, son de cuarzo, por lo que no habría que preocuparse acerca de su resistencia y durabilidad. Si se trata de arena proveniente de machaqueo o chancadas, se las puede considerar de buena calidad siempre y cuando provengan de una buena fuente.

La resistencia de la grava se encuentra ligada a su dureza, densidad y módulo de elasticidad. Para este propósito se realizan ensayos de resistencia al desgaste por abrasión mediante la máquina de Los Ángeles.

Dentro de los Áridos de los cuales debemos cuidarnos se encuentran las rocas volcánicas sueltas (palmes, toba) y las rocas sedimentarias (caliza-dolomita).

No deben ser utilizados en hormigones las calizas blandas (feldespatos, yesos) ni tampoco piritas o rocas porosas.

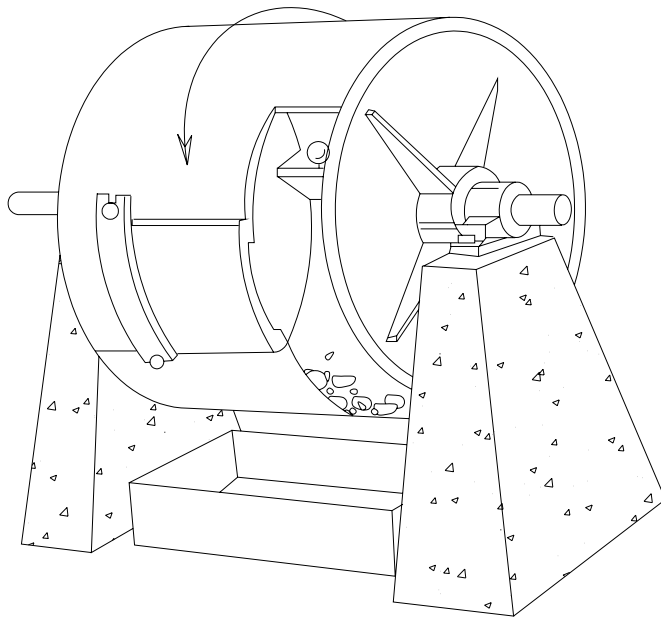
2.5.3.1. PRUEBA DE ABRASIÓN LOS ÁNGELES (NB 302) (ASTM C 131)

Esta es la prueba que más se aplica para averiguar la calidad global estructural del agregado grueso. Este método establece el procedimiento a seguir para determinar el desgaste, por abrasión, del agregado grueso, menor de 1½" (38 mm), utilizando la máquina de Los Ángeles (Figura 2.2).

El procedimiento para determinar el desgaste por abrasión de agregado grueso mayor a ¾" (19 mm) utilizando la máquina de Los Ángeles, se describe en la ASTM C-535. El porcentaje de desgaste determinado en ambas condiciones (ASTM C 131 y ASTM C-535) no es el mismo.

La muestra consistirá de agregado limpio y debe ser representativa del material que se vaya a ensayar.

Una vez que se alcanza el número requerido de revoluciones del tambor, se tamiza el agregado para determinar el porcentaje de agregado que ha sido reducido hasta un tamaño menor que 1.7mm (tamiz N°12). Excepto en el caso de la escoria siderurgica, la prueba parece dar un índice útil de la integridad estructural global del agregado.



La máquina de Los Ángeles consiste en un tambor cilíndrico hueco, de acero, cerrado en sus extremos. La carga abrasiva consiste de esferas de acero. Cada una de ellas debe pesar entre 390 y 445 gramos, esta carga depende de la granulometría de la muestra a ensayarse. Un anaquel que está en el interior del tambor rotatorio recoge la carga de bolas y agregado en cada revolución y la deja caer conforme se aproxima al punto más alto de su recorrido. De este modo el agregado experimenta cierta acción de frotamiento y vuelcos, así como un impacto considerable, durante las 500 revoluciones que especifica la norma.

FIGURA 2.2 Máquina de abrasión de Los Ángeles
Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 6

Una valiosa información referente a la uniformidad de la muestra que se ensaye puede obtenerse determinando la pérdida por desgaste después de 100 revoluciones, Esta debe determinarse sin lavar el material. La relación entre la pérdida por desgaste al cabo de 100 revoluciones y la obtenida al cabo de 500 revoluciones, no deber exceder de 0,20 para materiales de consistencia uniforme.

Después de efectuar la determinación anteriormente mencionada, se coloca la muestra entera incluyendo el polvo resultante de la abrasión, para efectuar las 400 revoluciones que aun faltan para terminar el ensayo.

2.5.4. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN (ASTM C127 y ASTM C128)

La **Gravedad Específica** es la relación entre la densidad del agregado y la del agua (1000 kg/cm^3). Sin embargo, todos los agregados son porosos hasta cierto punto, lo que permite la entrada de agua en los espacios de los poros o capilares cuando se colocan en la mezcla de hormigón, o bien, ya están húmedos cuando entran al hormigón. Por lo tanto, la definición cuidadosa de la gravedad específica debe tomar en cuenta tanto el peso como el volumen de la porción de agua contenida dentro de las partículas. El agua libre que se encuentra sobre las superficies exteriores del agregado húmedo no entra en el cálculo de la gravedad específica, pero contribuye a la relación A/C del hormigón.

Se presentan cuatro estados en el agregado ilustrados en la figura 2.3, dependiendo del contenido de agua en sus poros y superficie:

1. Seco (Secado al horno)
2. Parcialmente Saturado
3. Saturado con la superficie seca (SSD, por sus siglas en ingles); poros llenos de agua y seco en la superficie.
4. Saturado húmedo en la superficie; poros llenos de agua y húmedo en la superficie.

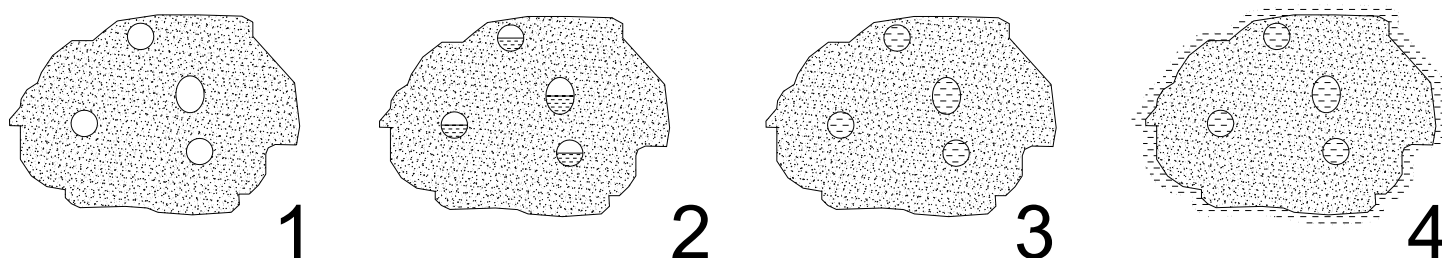


FIGURA 2.3 Estados de saturación de los agregados

Fuente: Elaboración Propia

La **Absorción** se define como el incremento de peso de un árido poroso seco, hasta lograr su condición de saturación con la superficie seca, debido a la penetración de agua a sus poros permeables.

La absorción es el valor de la humedad del agregado cuando tiene todos sus poros llenos de agua, pero su superficie se encuentra seca. En esta condición se hacen los cálculos de dosificación para elaborar el hormigón. Sin embargo el agregado en los acopios puede tener cualquier contenido de humedad (estados 2 a 4). Si la humedad del agregado es inferior a la absorción, se deberá agregar más agua al hormigón para compensar la que absorberán los agregados. Por el contrario, si la

humedad supera a la absorción, habrá que disminuir la cantidad de agua que se pondrá a la mezcla ya que los agregados estarán aportando agua.

El valor de la absorción es un concepto necesario para el ingeniero en obra, en el cálculo de la relación A/C de la mezcla de hormigón, pero, en algunos casos, puede ser que también refleje una estructura porosa que afecte la resistencia a la congelación y deshielo del hormigón.

No se suelen fijar límites de aceptación para la absorción debido a que ésta no solo depende de la porosidad de la roca, sino también de otros aspectos tales como la distribución granulométrica, contenido de finos, tamaño máximo de los agregados, forma de las partículas. Sin embargo se puede considerar como rocas de buena calidad aquellas que presentan una absorción menor 3% para agregado grueso, y menores a 5% para el caso de agregado fino (ver tabla 2.1).

La absorción de un agregado grueso se expresa arbitrariamente en términos del agua que entra en los poros o capilares durante un periodo de remojo de 24 h y se calcula sobre la base del peso del agregado secado al horno como sigue:

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{B - A}{A} \bullet 100$$

En donde: A [gr] = peso en el aire de muestra secada al horno.
B [gr] = peso en el aire de muestra saturada-seca en la superficie.

En la tabla 2.1 se dieron valores de la absorción promedio de diversos tipos de roca. Se observa que, típicamente, algunas de las rocas sedimentarias más porosas y más blandas tienen valores más altos de absorción.

La gravedad específica se puede calcular para un agregado totalmente seco (estado 1) o para un agregado en estado natural que puede estar seco en la superficie, pero contener humedad en sus poros (estado 2 ó 3).

$$\text{Grav. esp. de la masa} = \frac{A}{B - C} = \frac{A}{V}$$

y

$$\text{Grav. esp. de la masa}_{\text{SSD}} = \frac{B}{B - C} = \frac{B}{V}$$

Donde:

A [gr] = peso en el aire de muestra secada al horno.

B [gr] = peso en el aire de muestra saturada-seca en la superficie.

C [gr] = peso en el agua de muestra saturada.

V [cm³] = Volumen del agregado

En el sistema métrico la fuerza de empuje B – C, se puede considerar equivalente al volumen del agregado en centímetros cúbicos.

Se concluye que, si se conoce el valor de la absorción del agregado, se puede calcular la gravedad específica de la masa_{SSD} (base saturada-seca en la superficie), a partir de la gravedad específica de la masa, por la relación siguiente:

$$\text{Grav. esp. de la masa}_{\text{SSD}} = \text{grav. Esp. de la masa} (1 + \text{absorción})$$

en donde la absorción se expresa como una fracción decimal.

2.5.5. VACÍOS Y GRADACIÓN

Vacíos.- La cantidad de compactación, la forma, textura superficial y la gradación del agregado influyen de manera importante sobre la cantidad de vacíos. Un agregado bien graduado es aquel que contiene cantidades apropiadas de las partículas progresivamente más finas para llenar las aberturas entre los tamaños mayores y, de este modo, reducir el contenido de vacíos. No obstante, no se ha encontrado que un agregado excelentemente graduado, como para dar lugar a un mínimo de vacíos, sea fundamental para tener un hormigón aceptable. De hecho, los agregados con curvas granulométricas discontinuas en uno o más tamaños de tamiz, se han empleado con éxito e, incluso, algunos los recomiendan.

Los vacíos en los agregados se pueden determinar a partir de la relación:

$$\% \text{ Vacíos} = \left(1 - \frac{M}{S * 62.3} \right) * 100$$

Donde
S = gravedad específica de la masa (secada al horno)
M = peso unitario del agregado, pcf o kg/cm³

El valor de M dependerá del esfuerzo de compactación aplicado para consolidar el agregado, se calcula de la siguiente manera:

$$M = \frac{W}{V}$$

Donde:
M = Peso unitario del agregado, Kg/ m³,
W = Peso del agregado, Kg.
V = Volumen del molde, m³.

El contenido de vacíos de los agregados típicos del hormigón variarán entre el 30 al 50%.

Gradación.- Después de la excavación o explotación en la mina, los agregados del hormigón casi siempre se sujetan a un proceso de tamizado para proporcionar los tamaños adecuados para que exista una cantidad mínima de vacíos, los que serán ocupados por la pasta de cemento, como se muestra en la figura 2.4. La confirmación de que los tamaños deseados se encuentran presentes en el producto se realiza por el "análisis mecánico" o prueba de tamices (Figura 2.5).

Dependiendo de la naturaleza de los agregados que se empleen, es posible que deba mantenerse un balance bastante preciso entre la relación de las fracciones de agregado fino y de agregado grueso, para lograr la movilidad, plasticidad y ausencia de segregación deseadas, todo lo cual se agrupa en el término general "trabajabilidad".

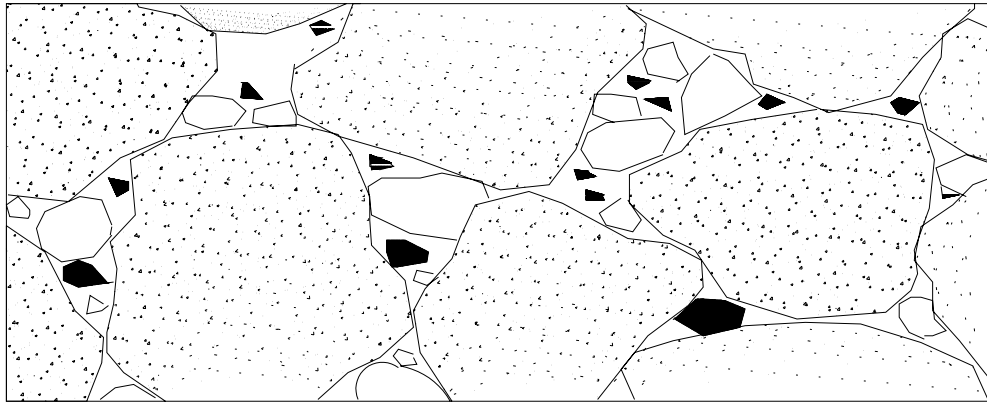


FIGURA 2.4 Áridos de granulometría continua – mínimos vacíos

Fuente: Elaboración Propia



FIGURA 2.5 Serie de Tamices
(Laboratorio de Geotecnia, UMSS)

Fuente: Propia

2.5.5.1. MÓDULO DE FINURA (M.F)

El módulo de finura, también llamado modulo granulométrico por algunos autores, no es un índice de granulometría, ya que un número infinito de tamizados da el mismo valor para el módulo de finura. Sin embargo, da una idea del grosor o finura del agregado, por este motivo se prefiere manejar el termino de Modulo de Finura.

El modulo de finura se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar (nombrados mas abajo) y dividiendo la suma entre 100. Por ejemplo, la tabla 2.5 muestra un análisis granulométrico típico de arena y la tabla 2.6 para la grava.

Cambios significativos en la granulometría de la arena tienen una repercusión importante en la

demanda de agua y, en consecuencia, en la trabajabilidad del hormigón, por lo que si hubiese una variación significativa en la granulometría de la arena deben hacerse ajustes en el contenido de cemento y agua para conservar la resistencia del hormigón. Para no tener que recalcular la dosificación del hormigón el módulo de finura del agregado fino, entre envíos sucesivos, no debe variar en más de ± 0.2 .

Los tamices especificados que deben usarse en la determinación del módulo de finura son:

No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, $\frac{3}{8}$ ", $\frac{3}{4}$ ", $1\frac{1}{2}$ ", 3" y de 6"

y el modulo de finura será:

$$MF = \frac{\sum \% \text{retenido}_{\text{acumulado}}(6" + 3" + 1\frac{1}{2}" + \frac{3}{4}" + \frac{3}{8}" + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100}$$

A continuación se presenta un ejemplo de gradación y calculo del modulo de finura, para un agregado fino (tabla 2.5) y uno grueso (tabla 2.6).

TABLA 2.5 CÁLCULO DEL MÓDULO DE FINURA PARA UN AGREGADO FINO

Tamiz No.	Abertura [mm]	Peso retenido [g]	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Porcentaje que Pasa	Requisito de % que Pasa [#]
3/8 "	9.525	0	0.0	0.0	100.0	100
4	4.75	22	4.1	4.1	95.9	95 a 100
8	2.36	65	12.0	16.1	83.9	80 a 100
16	1.18	103	19.0	35.1	64.9	50 a 85
30	0.6	119	22.0	57.0	43.0	25 a 60
50	0.355	157	29.0	86.0	14.0	10 a 30
100	0.15	60	11.1	97.0	3.0	2 a 10
bandeja		16	3.0			
total		542	100	295.2		

según la norma ASTM C33

$$MF = \frac{0 + 4.1 + 16.1 + 35.1 + 57 + 86 + 97}{100} = \frac{295.2}{100} = 2.95$$

Los valores de *M.F.* de 2.50 a 3 son normales para el agregado fino.

TABLA 2.6 CÁLCULO DEL MÓDULO DE FINURA PARA UN AGREGADO GRUESO

Tamiz No.	Abertura [mm]	Peso retenido [g]	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Porcentaje que Pasa	Requisito de % que Pasa [#]
1 1/2	37.5	0	0	0	100	100
1	25	1.2	4	4	96	95 a 100
3/4"	19	9.3	30	34	66	-
1/2"	12.5	6.8	22	56	44	25 a 60
3/8 "	9.5	4.3	14	70	30	-
4	4.75	8.4	27	97	3	0 a 10
8	2.36	0.9	3	100	0	0 a 5
bandeja		0	0	0		
total		30.9	100	360.8		

Según la norma ASTM C33 para un agregado entre 1" a N°4 (tabla 2.9)

$$MF = \frac{(0 + 34 + 70 + 97 + 100 + 100 + 100 + 100 + 100)}{100} = \frac{701}{100} = 7.01$$

Los valores de *M.F.* para el agregado grueso dependen del tamaño máximo del agregado.

2.5.5.2. CURVAS GRANULOMÉTRICAS

Una vez tamizado el árido se grafica en papel semilogarítmico el porcentaje que pasa por cada tamiz vs. las aberturas de los tamices en mm. (Figura 2.6)

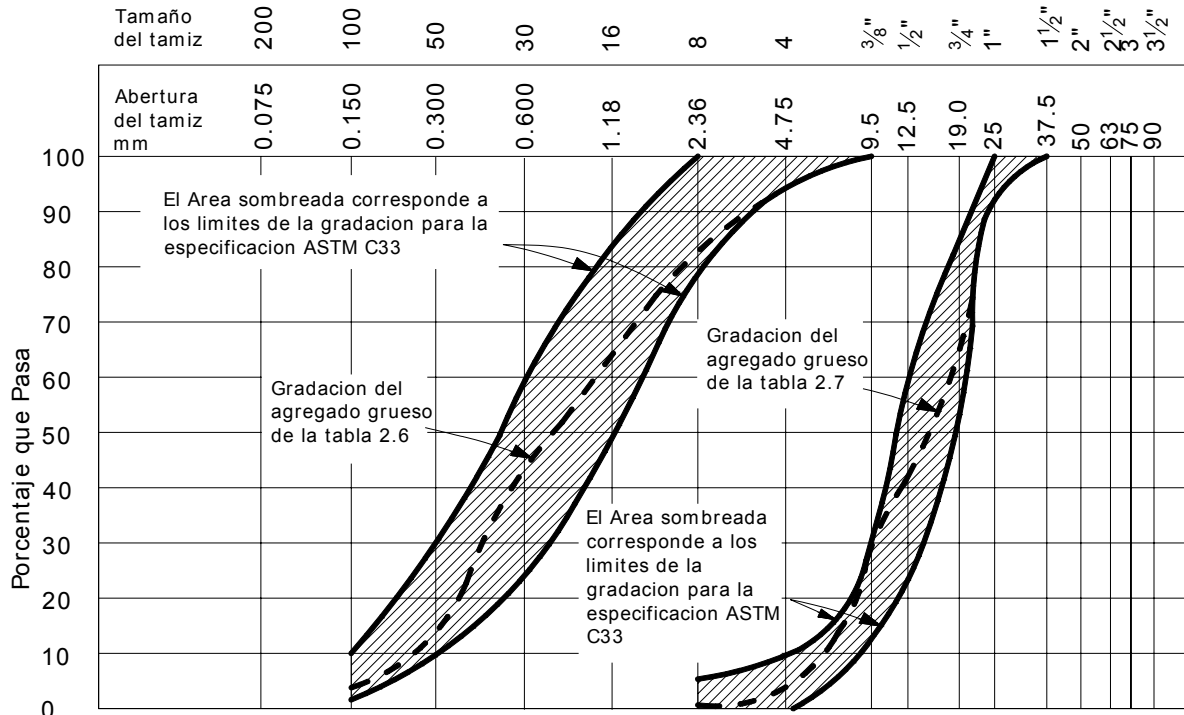


FIGURA 2.6 Gráfica de gradaciones del agregado. Gradación de la arena a la izquierda y la del agregado grueso a la derecha. (datos de la tabla 2.5 y 2.6)

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 6

En general las normas establecen límites entre los cuales se deben encontrar las curvas granulométricas, para considerar al árido como adecuado para el preparar el Hormigón.

En la figura 2.6 se han trazado las gráficas correspondientes al agregado fino y al grueso de las tablas 2.5 y 2.6, en las que aparecen áreas sombreadas con las que se indican los límites permisibles de gradación para los respectivos agregados, según se especifican en la ASTM C33. Esas gráficas de gradaciones revelan tendencias que son difíciles de estimar a partir de datos tabulados. Por ejemplo, la gráfica revela con claridad que el agregado grueso de la tabla 2.6 está muy cerca de no cumplir con la establecido para la gradación de 1" a №4 respecto a la cantidad que pasa el tamiz de 3/8", ya que la curva real de gradación casi queda fuera del área sombreada.

Los espaciamientos horizontales de la figura 2.6 son proporcionales al logaritmo de la abertura del tamiz.

Otras teorías utilizan curvas teóricas para el árido total (grava mas arena), con una forma parabólica que se aproxima a la gradación de máxima densidad y mínimo contenido de vacíos. Existen varios métodos para obtener curvas adecuadas a cada caso, cada uno de los cuales tiene su propio campo de aplicación. De estos métodos algunos se refieren a **granulometrías continuas**, en el que se encuentran presentes todos los tamaños de granos y otros a **granulometrías discontinuas**, en el que faltan algunos elementos intermedios, por lo que la curva granulométrica presenta un escalón horizontal, pudiendo decirse como idea básica que el primero es más trabajable y menos expuesto a segregación que el segundo, aunque con el segundo se pueden conseguir mayores resistencias cuando se estudia y fabrica cuidadosamente.

a) **Parábola de Fuller.**- Para hormigón armado, con áridos redondeados cuyo tamaño máximo sea de 50 ± 20 mm. y contenido de cemento no inferior a 300 Kg/m^3 , se obtienen buenos resultados mediante granulometrías continuas que siguen la siguiente ecuación:

$$p = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

p = porcentaje en peso que pasa por el tamiz.

d = abertura (diámetro) de cada tamiz.

D = tamaño máximo (diámetro) del árido.

La tabla 2.7 muestra los módulos de finura de áridos que siguen la parábola de Fuller según el tamaño máximo de árido.

TABLA 2.7 MÓDULO DE FINURA DE ÁRIDOS QUE SIGUEN LA PARÁBOLA DE FULLER SEGÚN EL TAMAÑO MÁXIMO DE ÁRIDO.

Tamaño máximo del árido, en mm	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Módulo de Finura	5.21	5.45	5.64	5.82	6.00	6.16	6.29	6.40	6.51	6.60

Fuente: Referencia 8

En hormigón armado, con áridos rodados cuyo tamaño máximo se encuentre entre 30 y 70mm, el empleo de la parábola de Fuller da buenos resultados, siempre que no existan secciones fuertemente armadas. Cuando se emplean áridos de machaqueo o en secciones muy armadas, puede emplearse el mismo método con algunas correcciones finales, en el sentido de aumentar algo el árido fino a costa del grueso.

b) **Parábola de Bolomey.**- En esta curva granulométrica se considera incluido el cemento, y su campo de aplicación es mucho mas amplio que el de la parábola de Fuller

$$p = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

p = porcentaje en peso que pasa por el tamiz.

d = abertura (diámetro) de cada tamiz.

D = tamaño máximo (diámetro) del árido.

a = según la tabla 2.8

TABLA 2.8 VALORES DE “A” PARA LA PÁRABOLA DE BOLOMEY

Consistencia del hormigón	Valores de “a”	
	Áridos rodados	Áridos machacados
Secas y plásticas	10	12
Blanda	11	13
Fluida	12	14

Fuente: Referencia 8

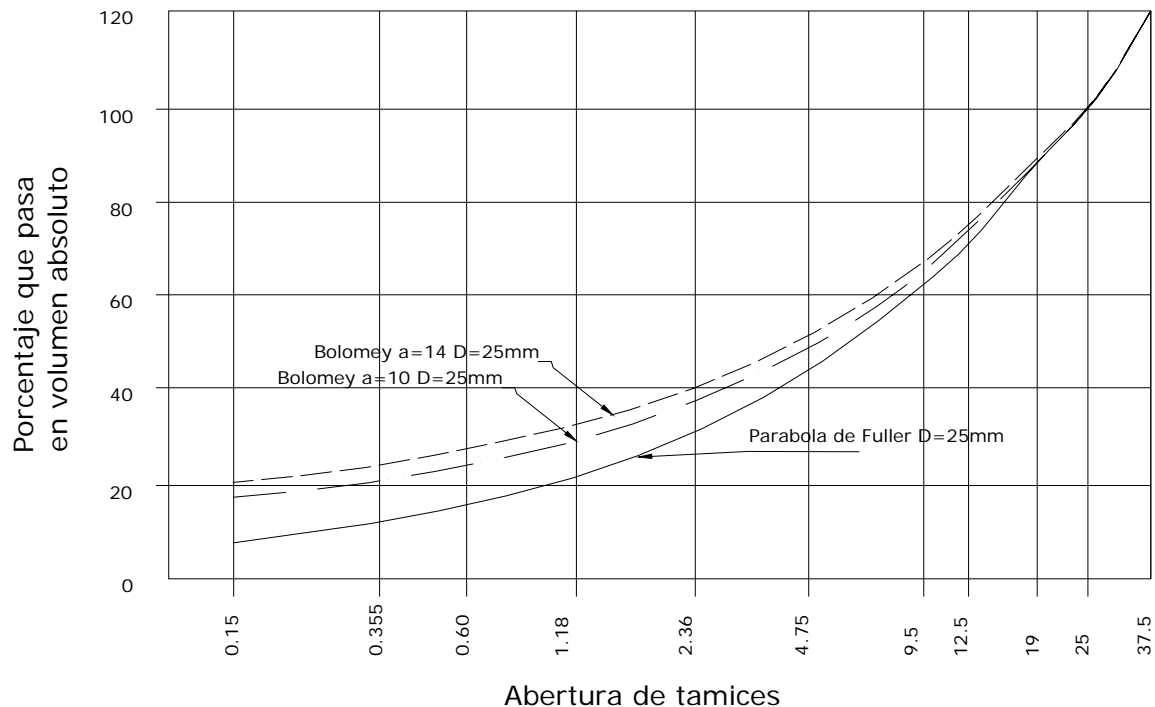


FIGURA 2.7 Parábola de Fuller y curva de Bolomey

Fuente: Elaboración Propia

c) *Método del Modulo de Finura*.- según Abrams, Hummel y otros autores, no es necesario ceñirse exactamente a una curva granulométrica teórica, sino que basta que el modulo de finura del árido sea el mismo que el de la curva teórica adoptada.

2.5.5.3. Tamaño máximo del agregado

El *Tamaño Máximo* designado para el agregado, siempre es un tamaño menor que aquél a través del cual se requiere que pase el 100% del material. Por ejemplo si el tamaño máximo de agregado requerido es de 1", el 100% deberá pasar el tamiz anterior (1½") y casi en su totalidad (entre 90-100%) el tamiz de 1". El *Tamaño Mínimo* es la máxima abertura de tamiz por el que pase menos del 15% en peso o se retenga en su totalidad. Habiendo definido estos dos valores, en la tabla 2.9 y 2.10 se muestra los requisitos de gradación, para el agregado grueso y fino respectivamente, dado por la ASTM C33.

TABLA 2.9 REQUISITOS DE GRADACIÓN PARA LOS AGREGADOS GRUESOS

Tamaño nominal	Cantidades mas finas que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), % en peso												
	4" 100 mm	3 1/2" 90 mm	3" 75 mm	2 1/2" 63 mm	2" 50 mm	1 1/2" 37.5 mm	1" 25.0 mm	3/4" 19.0 mm	1/2" 12.5 mm	3/8" 9.5 mm	No. 4 4.75 mm	No. 8 2.36 mm	No. 16 1.18 mm
3 1/2" a 1 1/2"	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5					
2 1/2" a 1 1/2"	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5					
2" a No. 4	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30 I	-	0-5		
1 1/2" a No. 4	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30 I	0-5		
1" a 3/8"	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40 I	0-15	0-5		
1" a No. 4	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	
3/4" a No. 4	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	
2" a 1"	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5				
1 1/2" a 3/4"	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5			
1 a 1 1/2"	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5			
3/4" a 3/8"	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5		
1 1/2" a No. 4	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	
3/8" a No. 8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30 I	0-10	0-5

Fuente: Referencia 4

TABLA 2.10 REQUISITOS DE GRADACIÓN PARA LOS AGREGADOS FINOS

Tamiz	Porcentaje que pasa
3/8"	100
No. 4	95-100
No. 8	80-100
No. 16	50-85
No. 30	25-60
No. 50	10-30
No. 100	2-10

Fuente: Referencia 4

La definición de tamaño máximo se vuelve importante al seleccionar proporciones para el hormigón que resulten coherentes con los requisitos de agua para la mezcla, dimensiones del encofrado y espaciamiento entre los aceros de refuerzo.

El tamaño máximo de un árido grueso será menor que las dimensiones siguientes:

TABLA 2.11 TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO, SEGÚN LA ACI Y EL EHE

ACI	EHE
<ul style="list-style-type: none"> 1/3 de la altura de losas 3/4 separación mínima entre armaduras 1/5 de la menor dimensión estructural 	<ul style="list-style-type: none"> 0,8 de la distancia horizontal libre entre vainas o armaduras que no formen grupo, o entre estas y el encofrado o entre un borde de la pieza y una vaina o armadura que forme un ángulo mayor que 45° con la dirección de hormigonado. 1,25 de la distancia entre un borde de la pieza y una vaina o armadura que forme un ángulo no mayor que 45° con la dirección de hormigonado. 0,25 de la dimensión mínima de la pieza encofrada o: <ul style="list-style-type: none"> 0.33 si se encofra por una sola cara o se trata de elementos prefabricados en taller. 0.4 en el caso de losas nervadas (no en las nervaduras)

Fuente: Elaboración Propia

Lo importante en cuanto a la granulometría es la gradación total, por lo que puede darse el caso de agregados que no entren dentro de los límites y que sin embargo mezclándolos en las proporciones

adecuadas, suministran una distribución de partículas eficiente. La Norma ASTM C33 indica que se podrán emplear agregados que no cumplan los requerimientos, si se demuestra que con ellos se obtienen hormigones que satisfacen las especificaciones técnicas del proyecto.

2.6. COMBINACIÓN DE AGREGADOS

Se intenta la combinación de agregados para diversos fines, por ejemplo, para mejorar un agregado con uno de mejor calidad de modo que el agregado combinado resulte aceptable, o para corregir las deficiencias en la gradación que puedan tener.

2.6.1. PROPORCIÓN DE MEZCLA DE DOS AGREGADOS

Un problema que se presenta a menudo es el de determinar en qué proporción mezclar dos o más materiales para cumplir una cierta gradación que cumpla con los requisitos establecidos por las normas, para los tamices que especifica esta.

Podemos describir dos métodos para conseguir esto:

- *Método grafico.*- En una grafica, donde en la parte superior e inferior se marcan los porcentajes a usar de cada agregado y a la derecha e izquierda los porcentajes que pasan, como la que se mostrara en el ejemplo que viene a continuación, se marcan los rangos que delimita la norma para el porcentaje que pasa para cada tamiz.
 - Se une por una línea el porcentaje que pasa del agregado “A”, a la izquierda del grafico, con el porcentaje que pasa del agregado “B”, a la derecha, para los tamices correspondientes entre si.
 - Se marca la intersección de esta línea con sus límites superior e inferior, del rango correspondiente al tamiz. Se repite esto para todos los tamices.
 - La marca con el límite inferior más a la derecha y la marca con el límite superior más a la izquierda, darán los valores para calcular las proporciones, en porcentaje, de cada agregado.
 - Estas dos marcas se prolongan hasta la parte superior e inferior de la grafica, obteniéndose dos valores, que se promedian, para obtener el porcentaje a usar de cada agregado.

Se tendrá una idea mas clara de este método realizando el ejemplo.

- *Método por tanteos.*- Sin trazar la gráfica de los datos. Por ejemplo, en primer lugar se podría prestar la atención a la cantidad que pasa el tamiz No. 50, ya que muchos técnicos del hormigón consideran que esta cantidad ejerce una influencia importante sobre la trabajabilidad del hormigón. En principio, podría considerarse una mezcla 50-50%, y ver si con esta relación

se satisfacen los requisitos para todos los tamices, y a partir de este primer tanteo variar las proporciones hasta cumplir con todos los tamices.

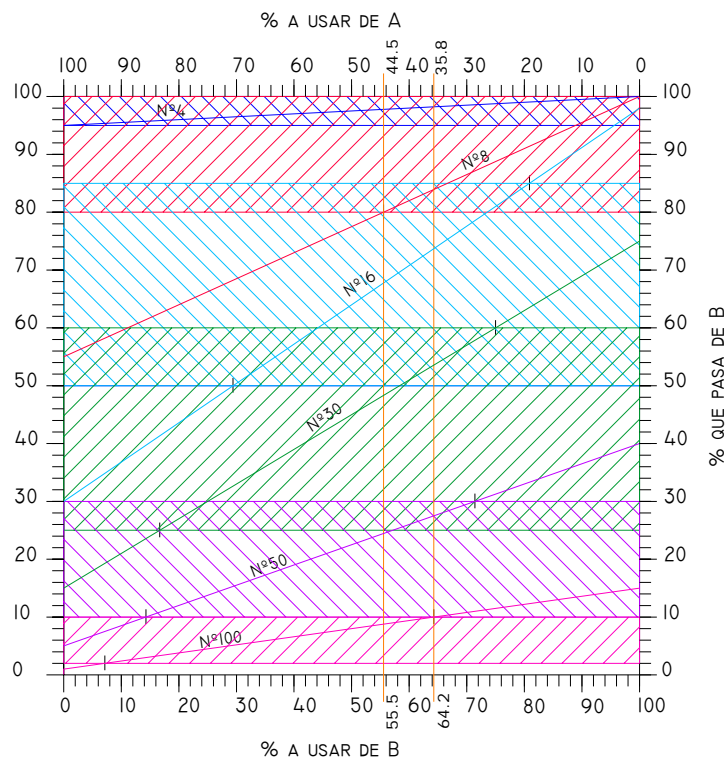
A continuación se presentan ejemplos para ambos métodos.

Ejemplo 1.-Considérense dos arenas hipotéticas, identificadas a continuación como "fina" y "gruesa", respectivamente. Sus gradaciones individuales que se dan en seguida están comparadas con los requisitos de la arena para hormigón dados en la ASTM C33.

Tamiz	porcentaje que pasa		
	A Gruesa	B Fina	Requisitos ASTM C33
3/8"	100	100	100
No. 4	95	100	95-100
No. 8	55	100	80-100
No. 16	30	98	50-85
No. 30	15	75	25-60
No. 50	5	40	10-30
No. 100	1	15	2-10

Ambas arenas, individualmente, no satisfacen los requisitos, por lo que se las mezclara intentando encontrar las proporciones adecuadas, para entrar dentro de los requisitos.

Método grafico



Fuente: Elaboración Propia

Porcentaje a usar:

$$\% \text{ de } A = \frac{44.5 + 35.8}{2} = 59.85 \approx 60\%$$

$$\% \text{ de } B = \frac{55.5 + 64.2}{2} = 40.15 \approx 40\%$$

Método por tanteos

En principio, se considerara una mezcla 50/50

Tamiz	Mezcla 50 / 50	Requisitos ASTM C33
3/8"	100*0.5 + 100*0.5 = 100	100
No. 4	100*0.5 + 95*0.5 = 97.5	95-100
No. 8	100*0.5 + 55*0.5 = 77.5	80-100
No. 16	98*0.5 + 30*0.5 = 64	50-85
No. 30	75*0.5 + 15*0.5 = 45	25-60
No. 50	40*0.5 + 5*0.5 = 22.5	10-30
No.100	15*0.5 + 1*0.5 = 8	2-10

Sin embargo, se ve que ésta no es una relación aceptable para el tamiz No. 8.

Entonces podría intentarse una relación 60/40, con lo que se proporciona un poco menos de la arena fina y se llega a lo siguiente:

Tamiz	Mezcla 60 / 40	Requisitos ASTM C33
3/8"	100*0.6 + 100*0.4 = 100	100
No. 4	100*0.6 + 95*0.4 = 98	95-100
No. 8	100*0.6 + 55*0.4 = 82	80-100
No. 16	98*0.6 + 30*0.4 = 71	50-85
No. 30	75*0.6 + 15*0.4 = 51	25-60
No. 50	40*0.6 + 5*0.4 = 26	10-30
No.100	15*0.6 + 1*0.4 = 9	2-10

La mezcla 60/40 satisface con éxito los requisitos de gradación de la ASTM C33 y, del mismo modo, su examen revela que sólo se podría usar una cantidad muy pequeña más de la arena fina, ya que la cantidad que pasa el tamiz No. 100 se encuentra ya cercano al límite superior.

2.6.2. MODULO DE FINURA DE UNA MEZCLA

Si se mezclan entre sí dos agregados, designados como A y B. que tienen módulos de finura de MF_A y MF_B , respectivamente, la mezcla resultante tendrá el siguiente módulo de finura:

$$MF_{mezcla} = \frac{MF_A * P_A}{100} + \frac{MF_B * P_B}{100}$$

en donde P_A y P_B son los porcentajes, en peso, de los agregados A y B, en la mezcla.

Ejemplo 2-

Si se mezclara una arena con un módulo de finura de 2.95 con un agregado grueso con un módulo de finura de 7.00 en la relación de 40% de arena a 60% de agregado grueso, la mezcla tendrá el módulo de finura:

$$MF_{mezcla} = \frac{2.95 * 40}{100} + \frac{7 * 60}{100} = 5.38$$

Ahora, si lo que se desea determinar, es en qué proporción combinar los materiales A y B para lograr cierto módulo de finura de la mezcla, se puede calcular el porcentaje de material que tiene que usarse a partir de:

$$P_A = \frac{MF_{mezcla} - MF_B}{MF_A - MF_B} * 100 ; P_B = 100 - P_A$$

Ejemplo 3.-

Si queremos un agregado con un modulo de finura de 5.2, combinando los agregados grueso y fino antes mencionados; entonces:

$$P_A = \frac{5.2 - 2.95}{7 - 2.95} * 100 = 55\% \text{ de agregado grueso}$$

por tanto la cantidad de agregado fino en peso, es $100 - 55 = 45\%$

2.7. SUSTANCIAS PERJUDICIALES

Es imprescindible que los agregados empleados en la preparación del hormigón se encuentren libres de material contaminante, es decir materia orgánica, arcilla, limo, sales, sulfatos, glucosas, etc. Puesto que estos materiales producen efectos adversos en el hormigón. Por ejemplo algunas partículas minerales, que en algunas condiciones de exposición con el hormigón, sufren un cambio excesivo en su volumen, con lo que se provoca la ruptura de la superficie del hormigón, o bien, crean esfuerzos internos suficientes como para causar agrietamiento y afectar la integridad estructural del propio hormigón. En otros medios ambientes, estos mismos tipos de minerales pueden tener una influencia despreciable.

En la tabla 2.12 se dan los limites para las sustancias perjudiciales cuya presencia está permitida en los agregados finos y gruesos, consideradas por la Norma Española (EHE) que es coincidente en varios de sus requisitos con la Norma Boliviana, pero al estar esta ultima desactualizada, se prefirió colocar los datos de la primera, y en las tablas 2.13 y 2.14 según la norma ASTM C33.

Partículas Suaves y Finas

Las partículas muy suaves como el Ocre son perjudiciales si están cercanas a superficies de hormigón sujeto a abrasión, ya que la delgada cubierta de mortero que está sobre las partículas será desalojada y los suaves fragmentos subyacentes se desgastaran, haciendo que la superficie se pique.

Las partículas de agregado, con un recubrimiento de arcilla pueden disminuir la adherencia con la pasta de cemento.

Los materiales semejantes a la arcilla, ya sea que se encuentren como recubrimiento de los agregados o estén dispersos como en las rocas de piedra caliza arcillosa, son objetables ya que entonces el volumen de la roca responde a los cambios en el contenido de humedad. La contracción y el hinchamiento de estas sustancias causaran agrietamiento perjudicial en el hormigón.

Una manera sencilla para determinar el porcentaje de material fino (arcilla) en la arena es como se indica en la figura 2.8.

A continuación se describe el efecto perjudicial de algunas de las sustancias restringidas:

Impurezas Orgánicas

En los agregados finos naturales a veces se presentan impurezas orgánicas, las cuales disminuyen la hidratación del cemento y el desarrollo consecuente de la resistencia del hormigón. Normalmente, esas impurezas se evitan por medio del despeje adecuado del depósito, para eliminar por completo la tierra vegetal, y un enérgico lavado de la arena. La detección del contenido orgánico en la arena se lleva a cabo con facilidad por medio de la prueba colorimétrica con hidróxido de sodio, ASTM C40 (Figura 2.9). Algunas impurezas en la arena pueden dar indicación de un elevado contenido orgánico pero, en realidad, no ser dañino. Se puede determinar esta posibilidad por medio de la ASTM C87.

TABLA 2.12 LÍMITES PARA LAS SUSTANCIAS PERJUDICIALES EN EL AGREGADO PARA HORMIGÓN SEGÚN LA EHE

SUSTANCIAS PERJUDICIALES	Cantidad máxima en % del peso total de la muestra		Método de Ensayo	Riesgos que se corren si no se cumple la limitación	Observaciones
	Árido fino	Árido grueso			
Terrones de arcilla	1,00	0,25	NB 601	<ul style="list-style-type: none"> - Hormigón poco resistente. - Cangrejeras interiores y oquedades en las superficies. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se entiende por terrones las partículas que se deshacen bajo la presión de los dedos. - Suelen existir en las arenas de minas. - Especialmente peligrosos en medios agresivos.
Partículas blandas	-	5,00	NB 611	<ul style="list-style-type: none"> - Hormigón poco resistente 	<ul style="list-style-type: none"> - El ensayo mide la resistencia de los granos de la grava al rayado con latón. - Se detectan también las partículas duras aglomeradas débilmente (ciertas areniscas).
Material retenido por el tamiz 0,063 y que flota en un líquido de gravedad específica 2	0,50	1,00	NB 602	<ul style="list-style-type: none"> - Anomalías en el fraguado. - Cangrejeras - Hormigón poco resistente 	<ul style="list-style-type: none"> - Se refiere a partículas de carbón, madera. Materias vegetales, etc. Deben prohibirse totalmente. - No es corriente encontrar áridos que incumplan este ensayo.

Compuestos totales de azufre expresados en SO_3 y referidos al árido seco,		1,00	1,00	NB 603	<ul style="list-style-type: none"> - Alteraciones en el fraguado y endurecimiento. - Pérdidas de resistencia. - Gran disminución de la durabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Suelen provenir de sulfatos (yeso, anhidrita) o de sulfuros (piritas). - Atención al contenido en sulfatos del cemento y del agua, cuando se esta cerca del limite.
Sulfatos solubles en ácidos, expresados en SO_3 y referidos al árido seco		0,80	0,80	-	<ul style="list-style-type: none"> - Ataque al hormigón - Procesos expansivos que destruyen el hormigón. 	<ul style="list-style-type: none"> - Puede protegerse el hormigón utilizando un cemento resistente a los sulfatos. - Convienen asegurar un grado suficiente de impermeabilidad.
Cloruros expresados en Cl^- y referidos al árido seco	hormigón armado u hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración	0,05	0,05	-	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosión de las armaduras. 	-
	hormigón pretensado	0,03	0,03			
Finos que pasan por el tamiz 0.063mm		5,5	1,00	NB 612	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de adherencia pasta-árido - Hormigón figurable por retracción - Hormigón poco resistente 	<ul style="list-style-type: none"> - los finos son mas peligroso con áridos rodados que con machacados. - Los finos incluyen limos, arcillas, sales solubles y otras impurezas.
Sustancias que reaccionan perjudicialmente con los álcalis del cemento		0,00	0,00	NB 600	<ul style="list-style-type: none"> - Procesos fuertemente expansivos que destruyen el hormigón. 	<ul style="list-style-type: none"> - Puede darse con ciertos áridos silicios de naturaleza opalina o similar. - Es raro encontrar áridos que no cumplan el ensayo correspondiente.
Coeficiente de forma de la grava.		-	0,20*	NB 610	<ul style="list-style-type: none"> - Hormigón poco trabajable y de difícil compactación. - Escasa resistencia y compacidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se admiten valores inferiores, previos ensayos de comprobación del hormigón en laboratorio.
Índice de lajas de la grava.		-	35*	-	<ul style="list-style-type: none"> - Hormigón poco trabajable y de difícil compactación. - Escasa resistencia y compacidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se admiten valores inferiores, previos ensayos de comprobación del hormigón en laboratorio.

* valores **no** expresados en %

Fuente: Elaboración Propia en base a Referencia 5 y Referencia 8

TABLA 2.13 LÍMITES PARA LAS SUSTANCIAS PERJUDICIALES EN EL AGREGADO FINO PARA HORMIGÓN SEGÚN LA ACI

Concepto	% máximo en peso de la muestra total
Terrones de arcilla y partículas desmenuzables	3.0
Material mas fino que el tamiz No. 200 (de 75 μm)	
Hormigón sujeto a abrasión	3.0
Todos los demás hormigones	5,0
Carbón mineral y lignito	
En donde la apariencia superficial del hormigón tiene importancia	0.5
Todos los demás hormigones	1.0

* En el caso de la arena fabricada, si el material más fino que el tamiz No 200 consta del polvo de la fractura, que no contiene en esencia arcilla o arcilla esquistosa, se pueden aumentar estos límites hasta un 5 y 7%, respectivamente

Fuente: Referencia 4

TABLA 2.14 LÍMITES PARA LAS SUSTANCIAS PERJUDICIALES EN EL AGREGADO GRUESO PARA HORMIGÓN SEGÚN LA ACI

Concepto	% máximo en peso de la muestra total
Terrones de arcilla y partículas desmenuzables	5.0
Partículas suaves ^ψ	5.0
Chert como impureza ⁺ que se desintegrará en cinco ciclos de la prueba de solidez, o bien, en 50 ciclos de la congelación y deshielo (0 a 40°F) [✕] ; o bien, que tenga una gravedad específica, saturado-seco en la superficie, de menos de 2.35	
Exposición severa	1.0
Exposición moderada	5.0
Material más fino que el tamiz No. 200	1.0 [§]
Carbón mineral y lignito	
En donde la apariencia superficial del hormigón tiene importancia	0.5
Todos los demás hormigones	1.0

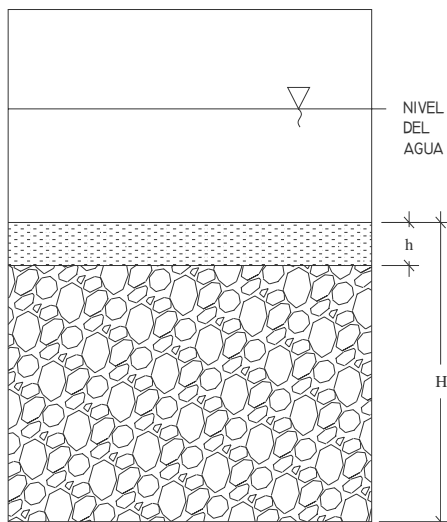
^ψ Esta limitación sólo se aplica cuando la blandura de las partículas individuales de agregado grueso es crítica para el comportamiento del hormigón, por ejemplo, en piso de tráfico pesado u otras exposiciones en donde la dureza superficial tiene importancia especial.

⁺ Estas limitaciones sólo se aplican a los agregados en los que la chert aparece como una impureza. No son aplicables a las gravas constituidas en forma predominante por chert. Las limitaciones sobre la solidez se deben basar en los registros de servicio, en el medio ambiente en el que se usan.

[✕] La desintegración se considera como una división o ruptura real, según se determina mediante un examen visual.

[§] En el caso de los agregados triturados, si el material más fino que el tamiz No 200 consta de polvo de la fractura, que en esencia no contiene arcilla o arcilla esquistosa, el porcentaje se puede aumentar hasta 1.5.

Fuente: Referencia 4



- Llenar un frasco de vidrio con agua,
- Añadir la arena a ensayar, y menear con una espátula (se puede añadir Cloruro de Calcio para acelerar el proceso de sedimentación).
- Dejar reposar hasta que se asiente.

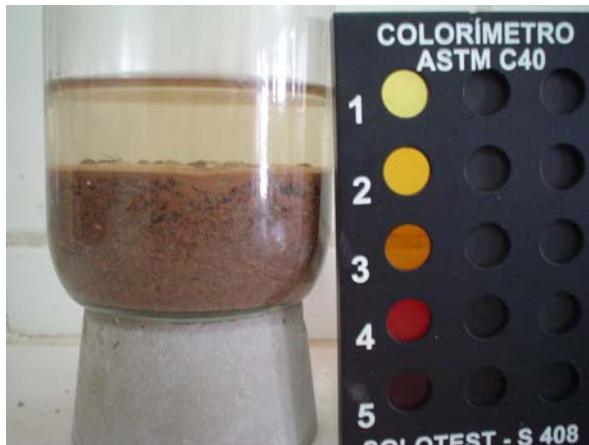
Si la arena está sucia se diferenciará claramente dos estratos, la arena abajo y encima el material fino.

Se mide la altura total "H" (arena + finos) y la altura de finos "h". El contenido de finos no debe sobrepasar el 6 % de la altura total.

Este ensayo da una buena referencia de la limpieza de la arena.

FIGURA 2.8 Método sencillo para determinar el porcentaje de material fino

Fuente: Elaboración Propia



Ensayo del colorímetro, a la izquierda el frasco, con la muestra de agregado fino, después del ensayo, a la derecha el colorímetro, para la comparación de colores.

El color mas claro (1) representa un agregado exento de material orgánico, el mas oscuro (5) un alto contenido de material orgánico.

En la fotografía se aprecia que la muestra estaba libre de contenido orgánico.

FIGURA 2.9 Ensayo del colorímetro
Laboratorio de suelos COBOCE HORMIGÓN

Fuente: Propia

Reacción Álcali - Agregado

Todavía otra clase de rocas reaccionan en forma perjudicial con los álcalis del cemento, dando lugar a la "reacción Álcali-Agregado" o a la "reacción Álcali-Carbonato de la roca". Como resultado de esta reacción se produce un gel que absorbe el agua, dando lugar a una hinchazón importante que puede originar fuertes presiones sobre la pasta de cemento, produciendo su rotura.

Se han producido expansiones severas y fuertemente destructivas, para hormigones en medios ambientes húmedos cuando los álcalis del cemento, Na_2O y K_2O , están presentes en cantidades que sobrepasan el 0.6% en peso, expresadas como Na_2O equivalente, y los agregados contienen cantidades suficientes de Ópalo, Calcedonia, Tridimita, Cristobalita y ciertas Riolitas, Andesitas o Dacitas.

Presencia de Agua interna

Aunque el agua en si no es una sustancia perjudicial, la humidificación y el secado o congelación y deshielo en un agregado saturado serán destructivos para algunos tipos de roca, en particular para los hormigones ligeros, las cherts porosas, las piedras calizas intensamente arcillosas y algunas arcillas esquistosas.

El agua se expande en alrededor de un 10% al congelarse y puede ser intensamente destructiva cuando está contenida en los poros de un agregado que no puede absorber esa expansión.

2.7.1. POSIBLES SOLUCIONES

Se han desarrollado varios procesos para mejorar la calidad de los agregados que no cumplen con las especificaciones deseadas y poder reducir estas cantidades hasta las mínimas aceptables.

- Puede recurrirse al lavado para eliminar los recubrimientos de las partículas de agregado o para cambiar la granulometría.
- La separación en medio pesado, con el uso de un líquido de densidad específica variable, tal como una suspensión de agua y Magnetita y ferrosilicio finamente molidos puede utilizarse para mejorar los agregados gruesos. En este proceso el material ligero dañino se elimina por flotación y las partículas pesadas se sedimentan.
- El clasificador hidráulico, en el cual las partículas más ligeras son impulsadas hacia arriba por pulsaciones ocasionadas por aire o por diafragmas de hule, también es un procedimiento para separar las partículas ligeras.
- Las partículas blandas, desmenuzables, pueden separarse de las partículas duras, elásticas, por un proceso llamado fraccionación elástica. Los agregados se dejan caer sobre una superficie inclinada, de acero endurecido, y su calidad se mide por la distancia que rebotan.

2.8. SUMINISTRO Y ALMACENAMIENTO

Antes de comenzar el suministro, se deberá exigir al suministrador una demostración satisfactoria de que los áridos a suministrar cumplen los requisitos establecidos.

El suministrador notificará al comprador cualquier cambio en la producción que pueda afectar a la validez de la información dada.

Cada carga de árido irá acompañada de una hoja de suministro que estará en todo momento a disposición del Director de Obra, y en la que figuren, como mínimo, los datos siguientes:

- Nombre del suministrador.
- Nombre de la cantera.
- Fecha de entrega.
- Nombre del comprador.
- Tipo de árido.
- Cantidad de árido suministrado.
- Identificación del lugar de suministro.

Los áridos deberán almacenarse de tal forma que queden protegidos de una posible contaminación por el ambiente y, especialmente, por el terreno, no debiendo mezclarse los distintos tamaños de agregado.

Deberán también adoptarse las necesarias precauciones para eliminar en lo posible la segregación, tanto durante el almacenamiento como durante el transporte.

2.8.1. ESPONJAMIENTO DE LA ARENA HÚMEDA (ENTUMECIMIENTO)

La arena que está húmeda, como la que acaba de salir de una planta de lavado o incluso después de un almacenamiento prolongado en una pila de acopio, tiene un volumen bruto considerablemente mayor que el que le corresponde en estado seco, debido a la película de agua que rodea cada partícula. Estas delgadas películas de agua inhiben el resbalamiento de las partículas entre si para lograr una condición compacta, lo que da por resultado un volumen aparente mayor al real.

En la figura 2.10 se muestran el volumen típico de la arena versus su contenido de humedad. La mayor parte de las arenas para hormigón presentaran un volumen máximo con alrededor de un 5 a 6% de contenido de humedad.

La sensibilidad del volumen de la arena a cambios pequeños en el contenido de humedad y la incertidumbre resultante acerca de cuánta arena en realidad está contenida en un volumen dado de arena húmeda, hace desaconsejable calcular la dosificación por volumen en la obra, por lo que se recomienda hacerla por peso. Del mismo modo la base de compra de las arenas debiera hacerse por peso y no así por volumen.

El peso unitario suelto de la arena seca puede variar desde 1600 a 1800 kg/m³, y el de la misma húmeda, desde 1100 a 1600 kg/m³, lo cual indica variaciones del orden de 30% a 40% de la arena seca con respecto a la húmeda.

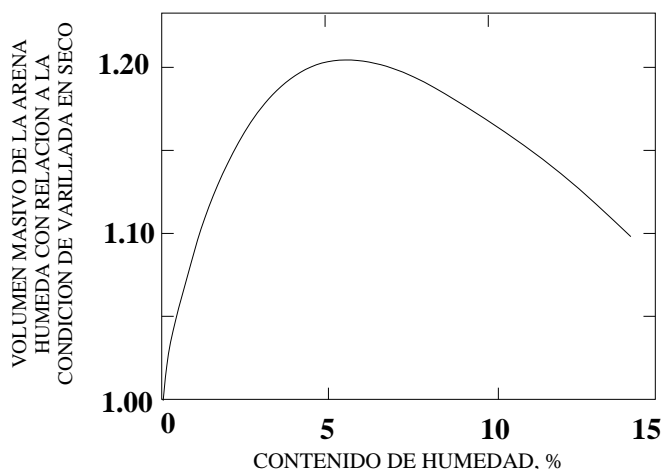


FIGURA 2.10 Volumen de arena suelta para hormigón vs. el contenido de humedad

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 6

2.9. AGREGADO DE HORMIGÓN RECICLADO.

En años recientes, el concepto de utilizar hormigón viejo de pavimentos, edificios y otras estructuras como una fuente de agregados ha sido demostrado en varios proyectos, resultando en un ahorro tanto de material como de energía.

El procedimiento consiste en:

1. Romper y extraer el Hormigón antiguo
2. Triturar en una trituradora primaria y secundaria
3. Retirar el refuerzo de acero u cualquier material embebido en el.
4. Realizar una gradación y lavar
5. Almacenar el agregado grueso y fino resultantes.

Es principalmente utilizado en reconstrucción de pavimentos. Ha sido usado satisfactoriamente como agregado en sub-bases granulares y de hormigón pobre, suelo cementos y en hormigón nuevo remplazando total o parcialmente al agregado convencional.

El hormigón reciclado, generalmente tiene una mayor absorción (del 3% al 10%) y baja gravedad específica en relación al agregado convencional. Esta alta absorción hace necesario el añadir mas agua para alcanzar la misma trabajabilidad y revenimiento que con el agregado convencional. Por este motivo se debe prehumedecer o mantener húmedo el acopio.

La forma de las partículas es similar al del agregado triturado como se puede apreciar en la figura 2.11. La densidad relativa decrece progresivamente a medida que el tamaño de partículas disminuye.



FIGURA 2.11 Agregado de Hormigón Reciclado
Fuente Referencia 9

Hormigón nuevo fabricado con agregado de hormigón reciclado, generalmente tiene buena durabilidad. La Carbonatación, permeabilidad y resistencia a la acción de la congelación y deshielo

han sido encontradas iguales o incluso mejores que del hormigón fabricado con agregado convencional.

Hormigón fabricado con agregado grueso reciclado y agregado fino convencional puede obtener una adecuada resistencia a la compresión. el uso de agregado fino reciclado puede resultar en pequeñas reducciones en la resistencia a la compresión. Sin embargo, el encogimiento por secado y deformación del hormigón hecho con agregado reciclado es arriba del 100% mayor que del hormigón hecho con agregado convencional. Por tanto, valores considerablemente menores de encogimiento por secado pueden ser obtenidos usando agregado grueso reciclado junto con arena natural.

Al igual que con cualquier agregado, el hormigón reciclado debe ser testeado a la durabilidad, gradación y otras propiedades.

2.10. AGREGADOS LOCALES

En este segmento se proveen datos de algunos de los agregados locales mas ampliamente utilizados en nuestro medio, tanto para cantos rodados como son los de Cliza, Parotani, Toco, Sichez y Punata, como para agregados chancados de Itocta y El Paso.

Estos datos fueron tomados de la tesis “Dosificación de Hormigones, empleando diferentes tipos de Agregados de la ciudad de Cochabamba” realizada por Edson Denis Alcocer Alvares en la UMSS, carrera de Ing. Civil, el año 2003. Otros bancos de acopio de agregados no fueron tomados en cuenta en este estudio.

Se presentan las propiedades físicas de los diferentes bancos de acopio en consideración, como ser: porcentaje de absorción, análisis granulométrico y determinación de gravedad específica; realizándose comparaciones de las cualidades y/o defectos que presentan los mismos en base a resultados obtenidos.

- **Cliza.-** Se encuentran ubicadas en el Valle Alto a 40 km de la ciudad de Cochabamba. En esta provincia pueden encontrarse 3 grandes bancos de acopio, los cuales aunque se encuentran en 3 regiones diferentes (Cliza, Toco y Sichez) pertenecen al mismo río y provincia. En estos bancos el lavado del material resulta ser muy pobre y el método de procesamiento bastante artesanal. Para la clasificación del material se cuenta simplemente con zarandas soportadas por puntales de madera con una cierta inclinación (fig. 2.12), lo que da una granulometría menos precisa.



FIGURA 2.12 Ubicación de los bancos de acopio analizados

Fuente: Elaboración Propia

- **Parotani.**- Esta localidad esta ubicada a 70 km al Oeste de la ciudad de Cochabamba, carretera a La Paz, el banco esta ubicado en el río Tapacari. Este material es considerado como uno de los de mejor calidad, es el más empleado en obras del medio y proporciona mejores resultados, aunque en otros bancos de esta zona se utilizan procesos artesanales (figura 2.13). De esta zona dos empresas son las principales proveedoras de agregado: Siajsa y Proagre; estas cuentan con plantas procesadoras y clasificadoras de agregado y lavado de arena, lo que mantiene la calidad del material en toda época.



FIGURA 2.13 Zarandas soportadas por puntales

Fuente: Referencia 10

- **El Paso.-** Se encuentra ubicado a 10 Km. de la ciudad de Cochabamba. En esta región puede encontrarse el agregado en estado natural (canto rodado), y chancado o triturado.
- **Punata.-** Se encuentra a unos 50 Km. de la ciudad de Cochabamba.
- **Itocta.-** Banco ubicado en el río Pucara a escasos kilómetros de la ciudad de Cochabamba.

Estos últimos tres cuentan con plantas clasificadoras.

En la tabla 2.15 y 2.16 se presentan, a modo de comparación, los resultados obtenidos, del estudio a los agregados de estos bancos.

TABLA 2.15 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE LA ARENA

Tamiz No.	Diámetro (mm)	Porcentaje que pasa								Requisitos ASTM C33
Procedencia		Cliza	Toco	Sichez	El Paso	Lomaco	Siajsa	Proagre	Punata	
3/8"	9.525	98.81	97.80	95.12	100.00	100.00	100.00	99.94	100.00	100
4	4.75	96.81	90.25	89.78	90.28	98.44	92.70	97.39	91.61	95 - 100
8	2.380	94.13	78.98	81.66	81.33	83.52	73.25	65.05	72.43	80 - 100
16	1.190	89.53	64.43	70.80	67.31	69.04	56.75	45.05	56.34	50 - 85
30	0.600	79.06	47.54	31.37	44.76	54.90	42.59	32.90	35.66	25 - 60
50	0.300	43.37	24.59	10.42	33.01	39.03	28.31	23.23	20.38	10 - 30
100	0.150	10.01	11.99	5.53	15.26	15.20	13.84	12.10	13.56	2 - 10
200	0.075	3.21	3.58	3.69	10.78	3.94	5.00	5.18	5.52	
bandeja		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

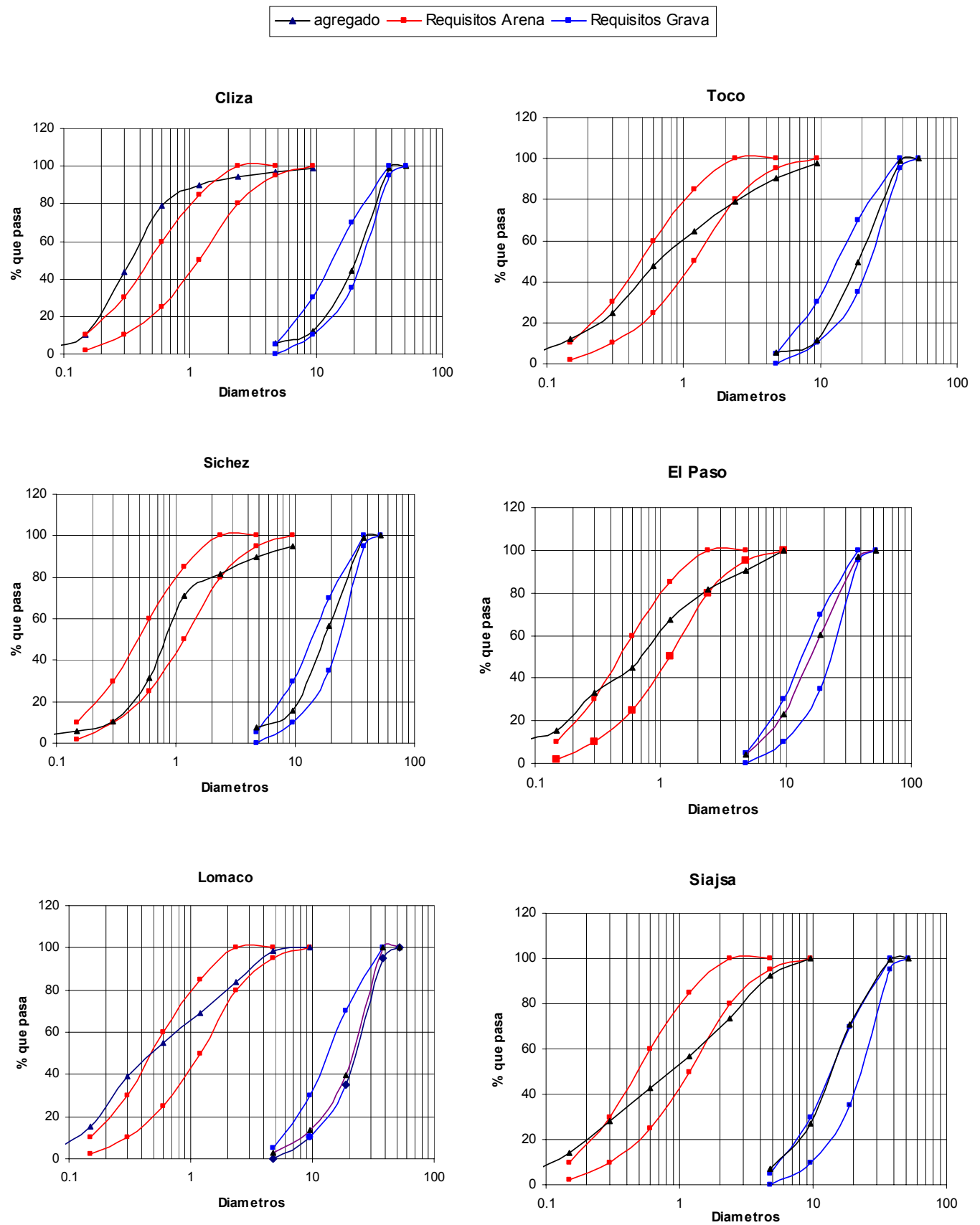
Fuente: Referencia 10

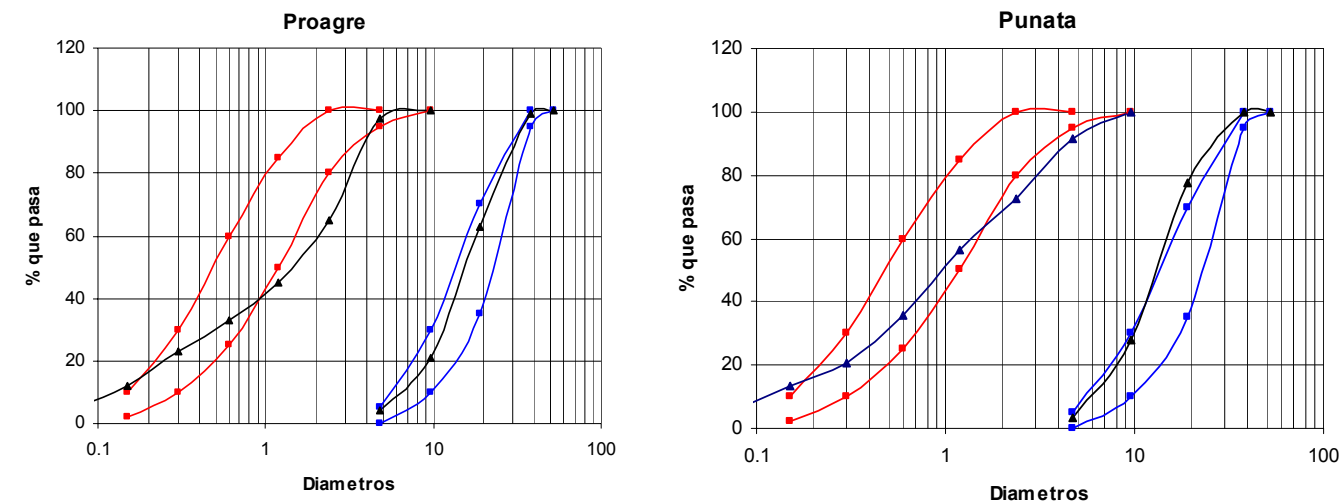
TABLA 2.16 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE LA GRAVA

Tamiz No.	Diámetro (mm)	Porcentaje que pasa								Requisitos ASTM C33
Procedencia		Cliza	Toco	Sichez	El Paso	Lomaco	Siajsa	Proagre	Punata	
2"	52	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100
1 1/2"	38	98.59	99.04	99.07	96.65	100.00	99.37	98.89	100.00	95 - 100
3/4"	19	44.15	49.51	56.33	60.05	39.67	70.94	62.76	77.75	35 - 70
3/8"	9.525	12.15	11.74	15.53	23.14	13.62	26.85	21.06	27.93	10 - 30
4	4.750	5.75	5.38	7.65	3.98	2.78	6.94	4.37	3.41	0 - 5
Bandeja		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Fuente: Referencia 10

A continuación se presentan las curvas granulométricas de los distintos agregados analizados:





Fuente: Referencia 10

Para el análisis de las propiedades se comparo, además, entre 2 muestras del mismo banco, una tomada en época de estiaje (M1), y la otra tomada en época de lluvias (M2)

ARENA	Parotani siajsa		Parotani proagre		Punata		Cliza		Sichez		Toco		El paso		Itocta	
	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2
Modulo de fineza	2.93	2.90	3.24	3.24	3.10	3.10	1.88	2.12	3.15	3.03	2.69	2.84	2.68	2.65	2.40	2.12
Peso Unitario Suelto (g/cm3)	1.64	1.66	1.62	1.62	1.38	1.38	1.67	1.67	1.67	1.70	1.69	1.67	1.57	1.61	1.59	1.55
Peso Unitario Varillado (g/cm3)	1.86	1.83	1.85	1.84	1.48	1.46	1.79	1.83	1.77	1.77	1.80	1.80	1.80	1.79	1.80	1.81
Peso Específico	2.62	2.55	2.43	2.53	2.67	2.66	2.63	2.70	2.70	2.69	2.71	2.69	2.66	2.63	2.45	2.42
% Absorción	2.60	2.20	2.60	2.30	0.94	1.01	0.60	0.38	0.59	0.70	0.44	0.40	1.80	1.70	1.80	1.70

Fuente: Referencia 10

GRAVA	Parotani siajsa		Parotani proagre		Punata		Cliza		Sichez		Toco		El paso		Itocta	
	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2
Modulo de fineza	6.96	7.40	7.13	7.45	6.91	7.25	7.39	7.33	7.21	7.29	7.34	7.37	7.16	7.17	7.44	7.39
Peso Unitario Suelto (g/cm3)	1.62	1.65	1.53	1.53	1.53	1.54	1.66	1.64	1.65	1.64	1.66	1.64	1.57	1.65	1.55	1.53
Peso Unitario Varillado (g/cm3)	1.82	1.70	1.75	1.76	1.64	1.60	1.64	1.63	1.75	1.74	1.74	1.71	1.74	1.76	1.85	1.80
Peso Específico	2.67	2.57	2.63	2.62	2.59	2.66	2.82	2.60	2.63	2.60	2.59	2.53	2.65	2.63	2.59	2.65
% Absorción	1.50	2.00	1.80	2.10	1.00	1.10	1.30	1.40	2.10	1.90	1.20	1.50	1.70	1.70	1.30	1.90
%Desgaste por Abrasión	30.11	29.01	28.83	28.85	17.76	19.63	22.23	22.20	24.04	24.14	22.12	22.05	23.09	24.01	31.52	32.22

Fuente: Referencia 10

Analizando los resultados se sacan las siguientes conclusiones para las arenas:

- La mayoría de estas curvas tienen un porcentaje que pasa el tamiz número 200, por encima del valor límite de 3%. Para los casos en que el porcentaje sea mayor al 4 % se recomienda realizar un mejor lavado.
- En ningún caso se tiene una curva granulométrica que se ajuste a los límites establecidos. Se recomienda realizar un mejor lavado, o encontrar una mezcla de dos bancos de acopio diferentes para corregir este problema.
- Se podría afirmar que las propiedades de las arenas son similares entre si y que los materiales en si son de buena calidad, pero que en cualquier caso se debe analizar el origen del mismo (especialmente el proveedor) debido a que puede presentar alteraciones bastante considerables entre un banco y otro, de un mismo río; ya que el sistema de extracción y lavado del material podría ser muy variable. Esto influye de sobremanera en los resultados a lograr, en especial el lavado de material. Se recomienda realizar una inspección al banco de acopio antes de la compra y observar el método de extracción y procesamiento del material.

En tanto que para las gravas se concluye:

- No presentan mayor variación entre un banco de acopio y otro. La variación más remarcada se presenta en la prueba al desgaste por abrasión. Por lo general los agregados provenientes de El Paso, tienen mayor resistencia al desgaste.
- Estas presentan curvas granulométricas que se acomodan dentro de los límites establecidos.

Nota.- debe tomarse en cuenta que este estudio solo es orientativo y que los valores aquí dados no deben tomarse como ciertos para todos los agregados provenientes de estos bancos de acopio, debido a que las características y propiedades podrían variar de manera importante dependiendo de la forma y lugar de extracción, y proceso de producción.

2.11. PRUEBAS PARA EL AGREGADO

El Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (**IBNORCA**), creado por en 1993 y ratificado como parte componente del Sistema Boliviano de la Calidad (SNMAC), es la Organización Nacional de Normalización responsable del estudio y la elaboración de Normas Bolivianas. Representa a Bolivia ante los organismos Subregionales, Regionales e Internacionales de Normalización, siendo actualmente miembro activo de varias organizaciones internacionales, entre las que se incluyen la Internacional Organization for Standardización ISO.

La American Society for Testing and Materials, (ASTM) es una organización con bases muy amplias formada por productores, consumidores y grupos de "interés general". Sus estándares son muy utilizados en nuestro medio, ya que están más actualizadas y tiene una mayor cobertura que nuestras normas.

En el anexo 7 se presentan resultados de ensayos para agregados, realizados guante la elaboración de este texto, en el laboratorio de COBOCE hormigón.

A continuación se presentan algunas de las especificaciones y ensayos de agregados para hormigón, dadas en la Norma Boliviana y su correspondiente en la ASTM, con una breve descripción, para que el interesado pueda dirigirse a ellas cuando lo necesite. Vale decir que ambas normas se encuentran para ser revisadas, y en el caso de la Norma Boliviana, a la venta, en el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (**IBNORCA**).

1. Especificaciones para Agregados del Hormigón, granulometrías, NB 596 y NB 598; ASTM C33. Proporciona las especificaciones para el agregado fino y el grueso, que no sean agregado ligero, para ser usados en el hormigón.
2. Método de Prueba de la Resistencia a la Abrasión del Agregado Grueso de Gran Tamaño mediante el Uso de la Máquina Los Ángeles, ASTM C535. En ésta se da el método para probar el agregado grueso con tamaño mayor a $\frac{3}{4}$ ". Este procedimiento es inadecuado para agregados del hormigón para la mayor parte de los usos. La norma Boliviana no hace la diferencia
3. Método de Prueba de la Resistencia a la Abrasión del Agregado Grueso de Tamaño Pequeño mediante el Uso de la Máquina Los Ángeles, NB 302; ASTM C131. Da el método para probar el agregado grueso de tamaño menor que $1\frac{1}{2}$ ". El agregado que, de otro modo, es idéntico, excepto por el tamaño, puede no dar el mismo valor de la abrasión cuando se prueba por este método y el C535 del inciso anterior.
4. Método de Prueba respecto a Terrones de Arcilla y Partículas Desmenuzables en los Agregados, NB 611; ASTM C142. Este método proporciona un medio para determinar, después de remojar la muestra, el contenido de partículas tan blandas y desmenuzables que se pueden romper con los dedos.
5. Determinación de materiales más finos que el Tamiz No. 200 en el Agregado Mineral, mediante Lavado, NB 612; ASTM C117. En esta prueba se evalúa el contenido de material fino que pasa el tamiz No. 200, el cual queda en suspensión o se disuelve cuando el agregado se agita vigorosamente con agua. También se le ha denominado "prueba de arrastre" o "pérdida por lavado".
6. Trozos Ligeros en los Agregados, partículas de bajo peso específico, NB 602; ASTM C123. Éste es un método mediante el cual se determina la cantidad de material más ligero que una gravedad específica seleccionada, por flotación en líquidos pesados. En la determinación del carbón mineral y el lignito, por ejemplo, se emplea un líquido cuya gravedad específica es de 2.00.
7. Impurezas Orgánicas en las Arenas para Hormigón (colorímetro), NB 609; ASTM C40. Se detectan las impurezas orgánicas potencialmente perjudiciales por observación del color, desarrollado por el líquido sobrenadante cuando se inunda la arena en una solución al 3% de hidróxido de sodio. Se cuenta con estándares en vidrio para la comparación del color, con el fin de facilitar la asignación de un color al líquido.
8. Efecto de las Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino sobre la Resistencia del Mortero, ASTM C87. Las arenas que se sospecha contienen cantidades perjudiciales de materia orgánica, detectada por el Método NB 609; ASTM C40 antes mencionado, se evalúan respecto al desarrollo de la resistencia a la compresión

en el mortero, mediante la comparación con la resistencia del mortero de la misma arena, cuando ésta se ha lavado por completo con una solución de hidróxido de sodio para eliminar la materia orgánica.

9. Determinación de la reactividad con los álcalis del cemento (Ensayo Químico), NB 600; ASTM C289. Este es el conocido como "método químico rápido" para la determinación de agregados que pueden presentar cambios perjudiciales de volumen en hormigón con cementos de alto álcali. Los resultados de esta prueba no son del todo confiables pero puede resultar útil si se combina, por ejemplo, con el examen petrográfico.
10. Práctica para el Muestreo de Agregados, NB 595; ASTM D75. Este método proporciona material útil en el muestreo de los agregados para el hormigón.
11. Método para el Análisis de Tamices de los Agregados Finos y Gruesos, NB 597; ASTM C136. Da los procedimientos detallados para conducir los análisis de tamices de los agregados.
12. Método Estándar de Prueba para el Índice de Forma y Textura de Partícula de los Agregados, ASTM D3398. Este método da el índice de partícula como una medida global de las características de forma y textura de las partículas.
13. Método de Prueba de la Solidez de los Agregados mediante el Uso del Sulfato de Sodio o el Sulfato de Magnesio, NB 599; ASTM C88. La prueba está diseñada para simular la acción destructiva de la congelación y el deshielo a los que algunos agregados son vulnerables cuando están empapados en agua. En este caso, los agregados se empapan alternadamente en una solución saturada de sulfato de sodio o de magnesio y, a continuación, se secan en estufa para liberar el agua de cristalización. La reinmersión causa acción expansiva en los poros de la roca, debido a la hidratación de los cristales desecados, y es semejante a la acción destructiva de la formación de hielo durante la congelación. Cinco ciclos de la prueba del sulfato se considera equivalente a muchos ciclos de congelación y deshielo.
14. Práctica para la Evaluación de la Resistencia a la Congelación de los Agregados Gruesos en el Hormigón con Aire Incluido por medio de Procedimientos de Dilatación Crítica, ASTM C682. En ésta se detallan los medios para evaluar la resistencia a la congelación del agregado grueso en el hormigón con aire incluido en el que se aplica el método de la congelación lenta, ASTM C671, (Método de Prueba para la Dilatación Crítica de Muestras de Hormigón Sujetas a Congelación). Los cambios no lineales de la longitud que ocurren en una muestra de hormigón, a medida que se enfría lentamente pasando por el punto de congelación, indican que no se puede absorber la expansión provocada por el agua en congelación y que el agregado contenido está causando que el hormigón sea vulnerable al ataque por congelación.
15. Método de Prueba para el Peso Unitario y los Vacíos en el Agregado, NB 608; ASTM C29. Este es un método preciso para determinar el peso unitario de los agregados secos en tres condiciones estándar de compactación: 1) varillado, 2) vibrado y 3) suelto (por paleo).
16. Nomenclatura Descriptiva Estándar para los Componentes de los Agregados Minerales Naturales), ASTM C294. Este método proporciona una breve descripción de los minerales en los agregados y los términos para describirlos.
17. Práctica Estándar para el Examen Petrográfico de los Agregados Estándar para el Hormigón, ASTM C295. Esta es un "estándar" importante, para el ingeniero en hormigón así como para el petrógrafo adiestrado.

18. Nomenclatura Descriptiva de los Componentes de los Agregados Minerales Naturales, ASTM C294. Esta da una descripción muy autorizada de los minerales que componen los agregados naturales.
19. Práctica para la Reducción de las Muestras de Campo del Agregado a la cantidad necesaria para las Pruebas, ASTM C702, Describe las técnicas para reducir las muestras, con el empleo de divisores o aparatos para cuarteo mecánicos.

BIBLIOGRAFIA

1. NB 594:1994 Áridos para Morteros y Hormigones – Definiciones.
2. NB 610:1991 Árido Grueso para Hormigones - Determinación del Coeficiente de Forma.
3. NB 596:1991 Áridos para Morteros y Hormigones – Requisitos.
4. ASTM C33-03 Standard Specification for Concrete Aggregates.
5. EHE (Instrucción de Hormigón Estructural) Artículo 28, Aridos, http://www.mfom.es/cph/norma_ehe.html.
6. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) “Manual de la Construcción con Concreto”. 3ª ed., Tomo I, McGraw_Hill, Mexico.
7. MERRITT F. S, LOFTIN M. K, RICKETTS J. T. (1999) “Manual del Ingeniero Civil”. 3ª ed. en español, Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
8. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) “Hormigón Armado”. 14ª ed., Gustavo Pili, SA, Barcelona.
9. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C. (2002) “Design and Control of Concrete Mixtures”, 14ª ed. Portland Cement Association, Illinois, USA.
10. Tesis “Dosificación de Hormigones, empleando diferentes tipos de Agregados de la ciudad de Cochabamba” (2003), Alcocer Alvares Edson Denis, U.M.S.S., carrera de Ingeniería Civil.
11. <http://www.construaprende.com>.
12. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association “Design and Control of Concrete Mixtures”. 14ª ed., www.portcement.org
13. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

CAPITULO 3

AGUAS

3.1. AGUA DE AMASADO Y AGUA DE CURADO

El agua, es un elemento de especial cuidado dentro el hormigón, debido al papel importante que desempeña, como agua de amasado y principalmente como agua de curado.

- El **Agua de Amasado**, cumple una doble función en el hormigón, por un lado participa en la reacción de hidratación del cemento, y por otro confiere al hormigón el grado de trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra. La cantidad de agua de amasado debe limitarse al mínimo estrictamente necesario para conferirle a la pasta la trabajabilidad requerida, según las condiciones en obra, ya que el agua en exceso se evapora y crea una red de poros capilares que disminuyen su resistencia.
- El **Agua de Curado** es la más importante durante la etapa del fraguado y el primer endurecimiento. Tiene por objeto evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento y evitar la retracción prematura.

El Agua de Curado tiene una actuación más duradera que el Agua de Amasado, y por lo tanto se corre más riesgos al aportar sustancias perjudiciales con el Agua de Curado que con el Agua de Amasado.

3.2. CALIDAD

El agua para amasar y curar el hormigón será satisfactoria si es potable (adecuada para el consumo humano). Esta debe estar razonablemente limpia y sin cantidades dañinas de materia orgánica, fango y sales. El límite máximo de turbidez debe ser de 2000 ppm*. Cuando las impurezas en el agua de mezclado son excesivas pueden afectar no solo el tiempo de fraguado, la resistencia y estabilidad del volumen sino también provocar eflorescencia o corrosión en el refuerzo.

En general se puede usar para mezclado y curado del hormigón, sin necesidad de realizar análisis, agua clara que no tenga sabor ni olor notorios, con excepción, casi exclusivamente, a las aguas de alta montaña ya que su gran pureza les confiere carácter agresivo para el hormigón.

El agua de ciénagas o de lagos estancados puede contener ácido tánico, el cual puede causar retardo en el fraguado y desarrollo de la resistencia. No obstante, algunas aguas visiblemente insalubres pueden también ser utilizadas, previo análisis de estas: aguas bombeadas de minas (que no sean de carbón ya que el agua mineral intensamente carbonatada puede producir reducciones apreciables en la resistencia), algunas de residuos industriales, aguas pantanosas, etc.

* Partes por millón

Podrán, emplearse aguas de mar o aguas salinas análogas para el amasado o curado de hormigones que no tengan armadura alguna. Salvo estudios especiales, se prohíbe expresamente el empleo de estas aguas para el amasado o curado de hormigón armado o pretensado.

En los casos en que se pueda elegir, debe usarse la fuente más limpia y clara de agua.

3.2.1. NORMAS

La Norma Española y la Americana difieren en la manera de considerar un agua para su utilización en el Hormigón.

- La Norma **ACI** cita:

“El agua no potable no será utilizada en hormigón a menos que cumpla las siguientes condiciones:

- La dosificación del hormigón debe basarse en pruebas en que se ha usado el agua de la fuente ha ser utilizada.
- El mortero de las pruebas hechos con agua no potable debe tener resistencias a los 7 y 28 días iguales o por lo menos del 90% de la resistencia de muestras idénticas, excepto por el agua de mezclado, que será potable.

Las Sales u otras sustancias nocivas contribuidas por el agregado o las adiciones deben sumarse a la cantidad que puede contener el agua de mezclado. Estas cantidades adicionales deben ser consideradas al evaluar la aceptabilidad del total de impurezas que pueden resultar nocivas tanto para el hormigón como para el acero.

La norma ACI establece que el agua debe estar limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceites, álcalis, sales, materia orgánica y otras sustancias nocivas para el hormigón, dando límites para la concentración del ion cloruro proveniente tanto del agua como del cemento, agregados y aditivos, tanto para hormigón presforzado como armado, como se muestra en la tabla 4.4; y la concentración de sulfato en el agua, como se muestra en la tabla 3.1

TABLA 3.1 REQUISITO PARA HORMIGÓN EXPUESTO A SOLUCIONES QUE CONTIENEN SULFATOS E ION CLORURO.

Exposición a sulfatos	Sulfato (SO ₄) en el agua, (ppm) (partes por millón)
Insignificante	$0 \leq \text{SO}_4 < 150$
Moderada *	$150 \leq \text{SO}_4 < 1500$
Severa	$1500 \leq \text{SO}_4 \leq 10000$
Muy severa	$\text{SO}_4 > 10000$
Tipo de Hormigón	Ion Cloruro soluble en agua, % por peso de cemento.
Hormigón Preesforzado	0.06%
Hormigón Armado expuesto a Cloruro en servicio.	0.15%
Hormigón Armado que estará seco o protegido de la humedad en servicio.	1.00%
Otras contricciones de Hormigón Armado	0.3%

* Agua de mar

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 2

- La ASTM C94 o AASHTO M 157

TABLA 3.2 LÍMITES DE LAS SUSTANCIAS PARA AGUA USADA EN LA MEZCLA

	Máxima concentración, ppm*	Método de Ensayo**
Sustancias o Tipo de Construcción:		
Cloruro, Cl.		ASTM D 512
• Hormigón Preesforzado o Losas de Hormigón para puentes	500 [£]	
• Otro tipo de refuerzo de Hormigón en ambientes húmedos o que contiene aluminio embebido o metales diferentes o con encofrados metálicos galvanizados.	1000 [£]	
Sulfatos, SO ₄ .	3000	ASTM D 516
Alkalís, (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O).	600	
Sólidos Totales.	50000	AASHTO T26

* Agua de lavado reusada como agua de mezclado en hormigón, puede exceder la concentración de Cloruro y Sulfato si se demuestra que la concentración calculada en el total del agua de mezclado, incluyendo agua aportada por los agregados y otras fuentes, no exceden los límites establecidos.

** Otros métodos de ensayo que hayan sido demostrado que proporcionan resultados comparables, pueden ser usados.

£Para condiciones permitidas de uso de CaCl₂ como aditivo acelerador, la limitación de Cloruro tal vez no deba ser aplicada por el comprador.

Fuente: Referencia 3

- La Norma Española (EHE) cita:

“Cuando no se posean antecedentes de su utilización, o en caso de duda, deberán analizarse las aguas, y salvo justificación especial de que no alteran perjudicialmente las propiedades exigibles al hormigón, deberán cumplir las condiciones indicadas en la tabla 3.3”.

Conviene analizar, sistemáticamente, las aguas que ofrezcan dudas para comprobar que no aumenta su salinidad o demás impurezas a lo largo del tiempo (como suele suceder, por ejemplo, cuando el abastecimiento proviene de pozos).

Si es absolutamente obligado emplear un agua sospechosa, convendrá forzar la dosis de cemento (no menos de 350 kg/m³) y mejorar la preparación y puesta en obra del hormigón.

En nuestra ciudad la empresa encargada de distribución de agua potable, SEMAPA, no permite el uso del agua de la red para su empleo en la construcción, por lo que al inicio de una obra se suele construir un tanque de almacenamiento -que en lo sucesivo será utilizado como el tanque de la construcción en cuestión- y se compra el agua de cisternas o se consigue el agua de la mejor fuente que se pueda encontrar en el sitio.

En el anexo 9 se muestra un análisis de agua para amasado de hormigón, realizado por el laboratorio regional de control de aguas de la UMSS.

TABLA 3.3 VALORES LÍMITE DE PARÁMETROS QUÍMICOS

Determinación		Limitación impuesta por la EHE	Riesgos que se corren si no se cumplen las limitaciones	OBSERVACIONES
PH (NB 518)		≥ 5	-Alteraciones en el fraguado y el endurecimiento. -Disminución de resistencias y de durabilidad.	
Sustancias disueltas totales (NB 587)		$\leq 15 \text{ gr/l}$ 15.000 p.p.m	-Aparición de eflorescencias u otro tipo de manchas -Pérdida de resistencias mecánicas. -Fenómenos Expansivos a largo plazo.	-Por sustancias disueltas se entiende el residuo salino seco que se obtiene por evaporación del agua. -En zonas sujetas a fluctuaciones de nivel de agua, conviene rebajar el límite a 5 g/l.
Contenido en Sulfatos, Expresados en Ion SO_4 (NB 523)		$\leq 1 \text{ gr/l}$ 1.000 p.p.m	-Alteraciones en el fraguado y endurecimiento: 0.5% de sulfato reduce la resistencia en un 4% y 1% de sulfato la reduce en un 10%. -Puede resultar gravemente afectada la durabilidad del hormigón.	-Atención al contenido de sulfatos del cemento y los áridos, cuando se está cerca del límite. -Se debe ser más estricto con el agua del curado.
Contenido de Ion cloro Cl^- (NB 520)	H°A°	$\leq 3 \text{ gr/l}$ 3.000 p.p.m	- Corrosión de armaduras u otros elementos metálicos, mermas en la sección de éstas, fisuraciones y disminución de adherencia. - Otras alteraciones del hormigón. - La sal común (cloruro de sodio) en concentraciones del 3.5% puede reducir la resistencia del hormigón de un 8 al 10%, pero es posible que no produzca otros efectos perjudiciales.	-Para hormigón en masa puede elevarse el límite de 3 a 4 veces.
	H°P°	$\leq 1 \text{ gr/l}$ 1.000 p.p.m		
Hidratos de Carbono (NB 588)		0	- El hormigón no fragua. - Otras alteraciones en el fraguado y el endurecimiento	-La sacarosa, glucosa y sustancias análogas alteran profundamente el mecanismo de fraguado de los cementos.
Sustancias orgánicas solubles en éter* (NB 638)		$\leq 15 \text{ gr/l}$ 15.000 p.p.m	-Graves alteraciones en el fraguado y/o endurecimiento. -Fueres caídas de resistencia.	-El ensayo pone de manifiesto la presencia de aceites y grasas de cualquier origen, humus y otras sustancias orgánicas vegetales, que muestran una interacción con la cal librada del cemento. -Atención a la materia orgánica de la arena cuando se está cerca del límite.

Fuente: Elaboración Propia en base a las Referencias 1, 4 y 5

BIBLIOGRAFIA

1. NB 637:1994 Agua para Morteros y Hormigones – Requisitos.
2. ACI 318M-02/318RM-02(metric) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
3. ASTM C94/C94M-04 Standard Specification for Ready-Mixed Concrete
4. EHE (Instrucción de Hormigón Estructural) Artículo 27, Agua. http://www.mfom.es/cph/norma_ehe.html.
5. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) "Manual de la Construcción con Concreto". 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
6. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". 14ª ed., Gustavo Gili, SA, Barcelona.
7. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association "Design and Control of Concrete Mixtures". 14ª ed., www.portcement.org
8. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

CAPITULO 4

ADITIVOS Y ADICIONES

4.1. INTRODUCCIÓN

Se llaman aditivos a aquellas sustancias o productos que incorporados al hormigón, mortero o pasta, antes o durante el amasado, producen una modificación deseada de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento en dicho hormigón, mortero o pasta, en estado fresco y/o endurecido.

Los aditivos podrán utilizarse siempre que se compruebe, mediante los oportunos ensayos, que la sustancia agregada en las proporciones y condiciones previstas produce el efecto deseado sin perturbar excesivamente las restantes características del hormigón ni representar peligro para la durabilidad del hormigón ni para la corrosión de las armaduras. Para esto la Norma Boliviana NB 1001, define los requisitos de calidad que todo aditivo debe cumplir para ser aceptado en la fabricación de hormigones, morteros y pastas, restringiendo su proporción a un máximo de 5%, con relación al contenido de cemento, salvo casos especiales.

El uso de los aditivos se justifica por razones técnicas y económicas ya que determinadas características del hormigón fresco y endurecido no pueden lograrse sin el uso de estos.

4.2. TIPOS Y USOS

Existen aditivos químicos que, en proporciones adecuadas, cambian las características y/o propiedades del hormigón fresco y del endurecido como el fraguado, la trabajabilidad, el endurecimiento, etc. También se encuentran aditivos con mas de una propiedad, (ej. plastificante incorporador de aire)

A continuación se da la clasificación que da la NB 1000:

- **Aditivos que modifican la reología de los hormigones, morteros o pastas, en estado fresco**
 - a) Reductores de agua (plastificantes)
 - b) Reductores de agua de alto rango (super-plastificantes)
- **Aditivos que modifican el fraguado y/o el endurecimiento de los hormigones, morteros o pastas**
 - a) Aceleradores de fraguado
 - b) Retardadores de fraguado
 - c) Aceleradores de endurecimiento
- **Aditivos que modifican el contenido de aire (o de otros gases) de los hormigones, morteros o pastas**
 - a) Incorporadores de aire
 - b) Generadores de gas

- c) Generadores de espuma
- d) Desaireantes o antiespumantes
- **Aditivos generadores de expansión**
- **Aditivos que mejoran la resistencia a las acciones físicas**
 - a) Aditivos protectores contra las heladas, para hormigones, morteros y pastas en estado endurecido
 - Incorporadores de aire
 - b) Aditivos protectores contra las heladas para hormigones, morteros y pastas en estado fresco
 - Aceleradores de fraguado
 - Aceleradores de endurecimiento
- **Aditivos que mejoran la resistencia a la congelación: anticongelantes**
- **Aditivos que reducen la penetrabilidad del agua (permeabilidad)**
 - a) Repulsores de agua o hidrófugos
- **Aditivos que mejoran la resistencia a las acciones fisicoquímicas**
 - a) Inhibidores de corrosión de armadura
 - b) Modificadores de la reacción álcali-áridos
- **Otros aditivos**
 - a) Aditivos para el bombeo
 - b) Aditivos para hormigones y morteros proyectados
 - c) Aditivos para inyecciones
 - d) Aditivo retenedor de agua
 - e) Aditivo multi-funcional
 - f) Colorantes

Existe una diversidad de marcas de aditivos en todo el mundo. En nuestro medio la más difundida es SIKA, aunque se pueden encontrar otras marcas en el mercado. Cada una de estas tiene a disposición una amplia gama de aditivos de acuerdo a las necesidades requeridas del consumidor. En la tabla 4.2 hacemos referencia al producto SIKA correspondiente a cada uno de los aditivos descritos anteriormente, cabe decir que existen otros productos dentro de esta misma línea que tienen mas de una propiedad. En el Anexo 1 se presentan las características, descripción, propiedades, campo de aplicación, modo de empleo, observaciones, consumo, almacenamiento y precauciones de manipulación de estos aditivos y de varios otros, así como de tratamientos superficiales (ver apartado 8.5.1), desmoldantes (ver apartado 13.6.2), selladores, membranas de curado (ver apartado 18.2.8), waterstops (ver apartado 17.3.2), etc., que no conciernen a este capítulo y que se describirán en los capítulos pertinentes.

A continuación se describen los aditivos más comunes:

4.2.1. REDUCTOR DE AGUA (PLASTIFICANTE)

Se puede emplear de las siguientes formas (ver figura 4.1):

- ① Como plastificante si se desea mejorar la trabajabilidad del hormigón fresco, manteniendo la cantidad de agua de amasado (sin modificar la relación A/C)
- ② Como reductor de agua de amasado (reduce hasta un 15% de agua de amasado, disminuyendo la relación A/C), mientras se mantiene la trabajabilidad del hormigón, mejorando así la resistencia del hormigón.
- ③ Se puede además, en forma controlada, conjugar los dos efectos, mejorando la trabajabilidad y reduciendo la relación A/C.

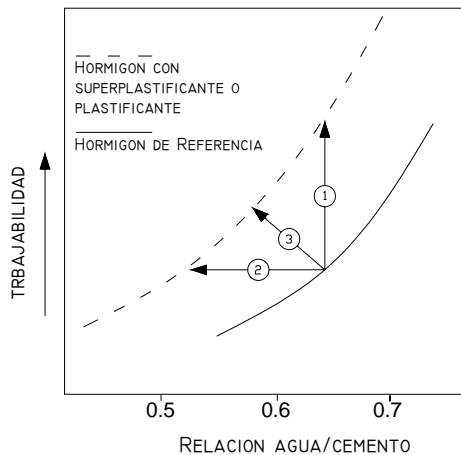
Se los suele utilizar en hormigones que van a ser preamasados y bombeados, y en hormigones que van a ser empleados en zonas de alta concentración de armadura.

Se debe tomar en cuenta que algunos pueden retrasar o adelantar el tiempo de fraguado, sobre todo si se emplean en dosis elevadas, por lo que deben tomarse las previsiones correspondientes.

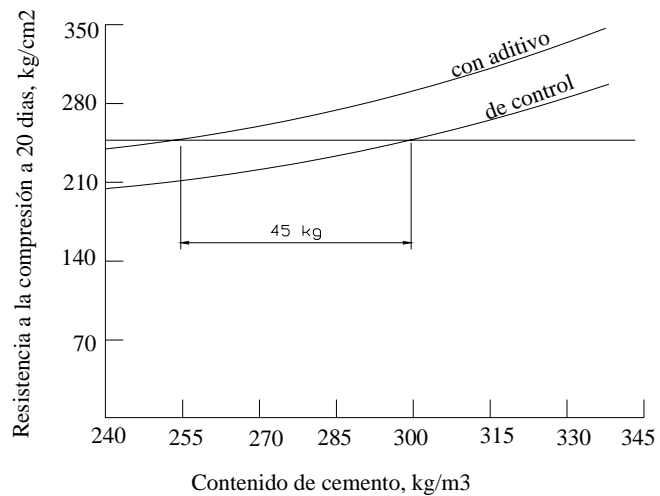
4.2.2. REDUCTORES DE AGUA DE ALTO RANGO (SUPER-PLASTIFICANTES)

Su función es la misma que la del plastificante, pero su efecto es más enérgico. Pueden convertir a un hormigón normal en un hormigón fluido, que no requiere de vibración para llenar todos los espacios de los encofrados, inclusive en sitios de difícil acceso para el hormigón. Así mismo, si se mantiene una trabajabilidad normal, estos aditivos permiten la reducción de la cantidad de agua de mezclado de hasta 30%, pudiéndose producir hormigón de muy alta resistencia. Por ejemplo se han logrado resistencias a la compresión de más de 1000 kg/cm², a 28 días. Debido a que alcanza altas resistencias en poco tiempo, se usa para reparaciones rápidas o para poder desencofrar en menos tiempo.

Debe tenerse en cuenta que los super-plastificantes pierden revenimiento rápidamente por lo que deben utilizarse antes de transcurridos 30 a 60 minutos de haberse añadido el aditivo. Esta pérdida de revenimiento es mayor en mezclas de bajo contenido de cemento y con temperaturas superiores a los 30 °C.

**FIGURA 4.1** Efecto de un super-plastificante

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 7

**FIGURA 4.2** Ahorros posibles en cemento por el uso de un reductor de la cantidad de agua

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 6

4.2.3. ACELERADOR

Aditivos cuya función principal es reducir o adelantar el tiempo de fraguado (inicial y final) del cemento que se encuentra en el hormigón, lo que significa además que el hormigón desarrollara su resistencia inicial antes que una mezcla sin este aditivo. Aunque la reducción del tiempo de fraguado, puede producir una disminución de las resistencias finales, que puede ser temporal.

Se los suele utilizar:

- Cuando se desea desencofrar antes de lo recomendado,
- En Hormigón lanzado,
- En Hormigonado a bajas temperaturas; para contrarrestar el efecto retardador de estas.
- Para anclajes, trabajos de reparación, impermeabilización rápida de infiltraciones de agua, etc.

Existen aditivos de fraguado extra rápido que se emplean en casos en que se requiera un endurecimiento y fraguado del hormigón en pocos minutos, como en la fundación de elementos dentro de cauces de ríos, en el mar o en túneles.

Cuando se dosifican en una proporción excesiva, se produce un efecto contrario (retardo del fraguado).

Existen muchos productos químicos que acelerarán el endurecimiento del cemento Pórtland. Entre éstos se encuentran los cloruros (de calcio, de sodio, de aluminio, etc), bromuros, fluoruros, carbonatos, nitratos, etc. Aunque los acelerantes a base de cloruros usados en el pasado no se emplean más en Hormigón Armado porque favorecen la acción corrosiva de las armaduras.

Debe tomarse en cuenta que el calor también acelera el fraguado, y que dependiendo de la cantidad de agua de amasado variara este tiempo. La temperatura de la mezcla puede influir en la eficacia de los aceleradores de fraguado.

4.2.4. RETARDADORES

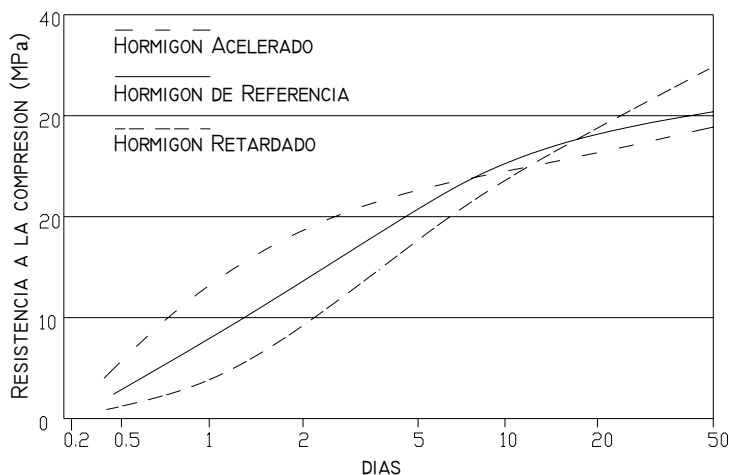
Estos retrasan el inicio del fraguado manteniendo por más tiempo su consistencia plástica.

Se los suele utilizar en:

- Hormigonado a temperaturas elevadas; para evitar el fraguado anticipado por evaporación del agua de amasado.
- Cuando la distancia de transporte es considerable.
- Hormigonado de grandes volúmenes, o superficies extensas.
- Hormigón masivo; para la atenuación en la liberación de calor de hidratación.

Estos aditivos producen retracción, por tanto es conveniente hacer ensayos previos.

Determinados retardadores de fraguado pueden producir, generalmente, una disminución de las resistencias mecánicas iniciales (efecto secundario); sin embargo, las resistencias mecánicas aumentan frecuentemente, a mediano plazo, con respecto al hormigón de referencia (figura 4.3).



La aceleración o desaceleración del proceso de fraguado mediante aditivos o mediante cementos apropiados, además de afectar la velocidad de obtención de resistencia del hormigón a corto plazo, tiene efecto sobre la resistencia del hormigón a largo plazo. La aceleración inicial del proceso conduce a resistencias menores a largo plazo, pues el agua de curado tiene menor nivel de penetración por el endurecimiento del hormigón. En cambio la retardo inicial del proceso determina resistencias mayores a largo plazo, pues el curado se vuelve más eficiente.

FIGURA 4.3 Efecto de los retardadores y de los acelerantes en la resistencia

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 7

4.2.5. AGENTES INCLUSORES DE AIRE

El rol de los agentes inclusores de aire o aireadores es introducir en el hormigón millones de pequeñas burbujas de aire, separadas y repartidas uniformemente. Estas micro-burbujas permanecen así durante el endurecimiento del material, de esta manera se mejora sensiblemente la resistencia al hielo y a las sales anticongelantes. Como resultado además se obtiene el mejoramiento de la trabajabilidad y la disminución de la segregación.

A medida que el agua se congela, pasa por un cambio de volumen, este da por resultado una presión hidráulica que puede ser suficiente para desintegrar el hormigón. La evaporación del agua y la subsiguiente cristalización de las sales para deshielo también pueden causar un fenómeno semejante. La experiencia de campo y en el laboratorio ha demostrado de modo concluyente que la inclusión adecuada de aire aumenta la resistencia del hormigón a la desintegración por congelación y deshielo, en un factor muy grande. Al satisfacer su finalidad, el aire incluido dará lugar a vacíos suficientemente cercanos como para reducir las presiones que tienden a desarrollarse.

De un 4 a 7% de aire incluido en relación al volumen del H^0 , darán por resultado una durabilidad óptima. Los incorporadores de aire tienen como efecto colateral la disminución de la resistencia del hormigón, aproximadamente en un 5% por cada 1% de burbujas de aire introducidas (Figura 4.4)

En los casos en que una mezcla sea deficiente en el volumen de cemento, la inclusión de aire incrementará la resistencia del hormigón. Con mezclas más ricas, en donde se tiene volumen suficiente de cemento, debilitará la mezcla (figura 4.5). Sin embargo, este castigo en la resistencia es más que compensado por el aumento en la durabilidad que imparte el aire incluido.

En el hormigón plástico, los huecos de aire incluido tienden a bloquear los capilares, que constituyen las trayectorias naturales para el escape del agua de exudación¹; por lo tanto, el hormigón con aire incluido tenderá a exudar menos que el hormigón sin ese aire, lo que permite realizar antes el acabado de la superficie del hormigón.

En el hormigón endurecido, estas burbujas de aire también tenderán a interrumpir los capilares, lo que da lugar a una menor absorción de agua. La inclusión de aire mejora mucho la trabajabilidad del hormigón y permite el uso de agregados deficientes en finos o mal graduados. Con la adición de aire incluido, para igual trabajabilidad, se puede reducir el agua de mezclado del 2 al 4% del aire incluido.

En los elementos pretensados mediante armaduras ancladas exclusivamente por adherencia, no podrán utilizarse aditivos inclusores de aire.

¹ Exudación = agua de amasado que tiende a subir hacia la superficie del hormigón ya colocado y compactado.

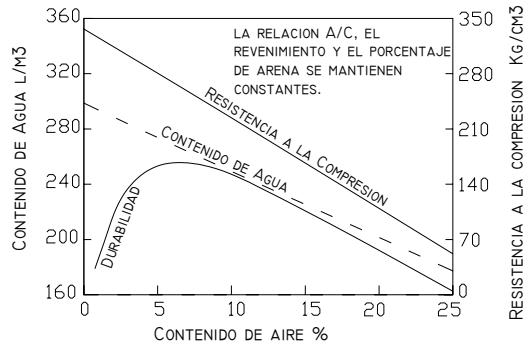


FIGURA 4.4 Efectos del contenido de aire sobre la durabilidad, la resistencia a la compresión y el contenido requerido de agua del hormigón.

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 6

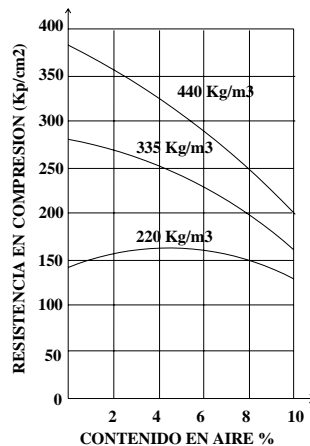


FIGURA 4.5 Influencia del aire incluido sobre la resistencia del Hº con distinto contenidos de cemento.

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 5

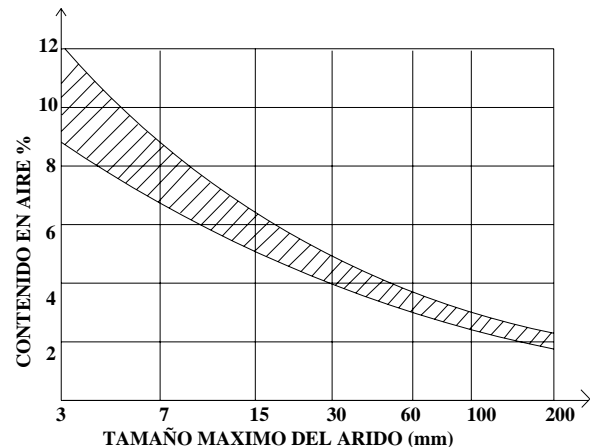


FIGURA 4.6 Contenido de aire ocluido según el tamaño máximo del árido.

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 5

4.2.6. IMPERMEABILIZANTES

Estos aditivos pueden reducir la profundidad de los poros visibles y pueden retardar la penetración de la lluvia en el hormigón o bloques porosos, mediante un aumento de compacidad de los hormigones. Estos aditivos no se pueden considerar agentes para proporcionar hermeticidad al agua, ya que no evitarán el paso de la humedad.

Cuando un hormigón ha sido correctamente dosificado, confeccionado y colocado, resulta por si mismo impermeable, tanto más cuanto menor sea su red capilar, es decir, cuanto mayor sea su compacidad, y sólo se presentan problemas en fallas como los panales de abeja, las grietas y otras zonas en donde no podría ayudar un aditivo para dar hermeticidad al agua.

Tomando en cuenta lo anterior, pueden emplearse impermeabilizantes que al cerrar los poros capilares, mejoran la compacidad del conjunto. Pero es evidente que su efecto será nulo si tales poros y capilares no son relativamente pequeños, es decir, si el hormigón está mal dosificado o mal ejecutado. **No se puede impermeabilizar un hormigón malo.**

Aparte de los impermeabilizantes que se adicionan a la mezcla, existen impermeabilizantes de superficie, que se aplican sobre las caras expuestas del hormigón endurecido y actúan solo sobre un pequeño espesor del mismo, estos se desarrollaran en el Apartado 8.5.1.

4.2.7. ADITIVOS EXPANSORES

Aditivos que se expanden durante el período de hidratación del hormigón o reaccionan con otros componentes del hormigón para causar expansión, se utilizan para reducir al mínimo los efectos de la contracción por secado.

La expansión controlada producida por estas adiciones puede ser de la misma magnitud que la contracción por secado esperado o puede ser levemente mayor.

4.3. DOSIFICACIÓN

Los aditivos se adicionaran según indicaciones del fabricante, por lo general en una cantidad menor al 5% de peso del cemento, pudiendo ser en el agua de amasado, en el agregado, etc. Una dosificación que no sea la conveniente puede influir de forma indeseable, a veces opuesta a la que se quería conseguir. Todos los aditivos se pueden adicionar después de que el hormigón se ha mezclado parcialmente. En ninguna circunstancia los aditivos deben adicionarse al cemento Pórtland antes de la adición del agua de mezclado.

Es posible que sea necesario adicionar dos o más aditivos de tipos diferentes a la mezcla de hormigón para obtener las características deseadas. La mayor parte de los aditivos son compatibles cuando se mezclan en el hormigón pero, en ninguna condición, debe permitirse que dos aditivos de tipos diferentes se mezclen entre si, antes de su adición a la mezcladora, ya que en la mayor parte de los casos, los aditivos reaccionarán provocando precipitación y pérdida de eficacia.

4.4. ALMACENAMIENTO

Los aditivos deberán transportarse y almacenarse de forma que su calidad no resulte afectada por influencias físicas o químicas.

El almacenamiento se debe realizar en envases bien cerrados, en lugares secos, frescos y bajo techo. Para todos los casos deben seguirse las direcciones de almacenamiento que indique el fabricante.

Ciertos aditivos se embarcan en forma de polvo para ser disueltos en agua antes de su adición al hormigón. En esos casos, sólo deben mezclarse en tanques de almacenamiento para tener la seguridad de que se adicionan todos los componentes del aditivo para cada amasado.

Tanto la calidad como las condiciones de almacenamiento y utilización, deberán aparecer claramente

especificadas en los correspondientes envases, o en los documentos de suministro, o en ambos.

TABLA 4.1 EFECTOS DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ADITIVOS EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

Tipo de aditivo	Plastificante	Super-plastificante	Acelerantes de fraguado	Retardadores de fraguado	Incorporadores de aire
Efectos en.....					
Trabajabilidad	aumenta	aumenta	-	-	Aumenta
Exudación	Aumenta o reduce (según el tipo)	Como reductor de la cantidad de agua con finos suficientes, no influye significativamente. Cuando se usa en hormigones pobres o deficientes en finos, o cuando se usa para producir hormigón de fácil flujo, se puede presentar una exudación severa	-	-	Disminuye
Cantidad de agua	Disminuye hasta un 15%	Disminuye hasta un 30%	-	-	Puede disminuir
Perdida de trabajabilidad	Rápida	Más rápida	-	-	-
Inicio del fraguado	Retarda o acelera (según el tipo)	Como reductor de agua afecta poco Como plastificante Retrasa	Adelanta	Retarda	-
Resistencia inicial		Aumenta	Aumenta	Disminuye	-
Resistencia final	Mantiene o aumenta	Aumenta	Disminuye	Aumenta	Disminuye
Permeabilidad	Disminuye	disminuye	-	-	Disminuye

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.2 PRODUCTOS SIKA.

ADITIVO	Fluidificantes	Super-Plastificantes	Retardadores de fraguado	Aceleradores de fraguado	Incorporador de aire	Impermeabilizante
PRODUCTO SIKA (ver anexo 1)	Plastiment H.E.	Sikament FF-86	Plastiment FF-86	SIKA 2 extra rápido SIKA 3	frioplast	SIKA 1 SIKA 4

Fuente: Elaboración Propia

4.5. ADICIONES

En general las adiciones, a diferencia de lo que ocurre con los aditivos, se agregan al hormigón en cantidades importantes, por lo que es necesario tenerlas en cuenta al determinar la composición volumétrica del hormigón.

Podrán utilizarse adiciones, para modificar favorablemente alguna de las propiedades del hormigón o conseguir ciertas características especiales tales como aislamiento térmico o acústico, determinada coloración, etc.

Tienen el carácter de adiciones, las escorias, cenizas volantes, ciertos polvos minerales, materiales

inertes, como los colorantes, materiales no minerales, de naturaleza orgánica, tales como ciertas resinas sintéticas. etc.

Al utilizar adiciones con el hormigón no deben sobrepasarse valores límites ya que, en caso contrario, pueden resultar perjudicadas la durabilidad del hormigón o la protección contra la corrosión, sin que esta influencia desfavorable pueda ser detectada mediante ensayos previos de corta duración.

Nota: Las adiciones de naturaleza orgánica sólo podrán utilizarse previa justificación mediante estudios detallados.

Aditivos minerales finamente divididos. Estos se adicionan al hormigón para aumentar el volumen de la pasta o para compensar la mala gradación de los agregados. Se pueden clasificar como químicamente inactivos (inertes), puzolánicos o cementosos. Las tres clases influyen sobre el hormigón plástico de la misma manera. Los materiales puzolánicos y cementosos pueden contribuir al desarrollo de la resistencia en el hormigón y, como consecuencia, suelen requerir menos cemento para producir una resistencia dada.

Cuando minerales finamente divididos se adicionan a hormigones deficientes en finos, la trabajabilidad mejora, reduce la razón y cantidad de exudación, y aumenta la resistencia. Cuando se adicionan polvos minerales a hormigón con finos suficientes, en particular a hormigones ricos en cemento Pórtland, en general disminuye la trabajabilidad para un contenido dado de agua; por lo tanto, aumenta la necesidad de agua y la contracción por secado y disminuye la resistencia. Por lo tanto, estos aditivos sólo tienen mérito en el hormigón pobre o en el hormigón fabricado con agregados deficientes en material que pase un tamiz N° 200.

La adición de polvos minerales finos disminuirá la eficiencia de los agentes inclusores de aire y, en general, tiene que aumentarse la proporción de ese agente inclusor cuando se adicionan estos polvos a la mezcla.

Los siguientes son ejemplos de aditivos minerales finamente divididos:

Material inerte: Cuarzo y piedra caliza molidos, Polvos triturados Cal y talco hidratados.

Tipos cementosos: Cementos naturales, Cales hidráulicas, Escoria siderurgica granulada.

Tipos puzolánicos: Estos se cubrirán ampliamente ya que es la única adición en los cementos producidos en Bolivia.

PUZOLANAS. Una puzolana es un material silíceo o silíceo y aluminoso que, por sí mismo, posee poco o ningún valor cementoso pero, en la forma finamente dividida y en presencia de humedad reacciona con el hidróxido de calcio, a las temperaturas ordinarias, para formar compuestos que poseen propiedades cementosas.

Las puzolanas de uso más común son la ceniza muy fina, el humo silíceo y puzolanas naturales, estas últimas utilizadas en los cementos Tipo IP producidos en Bolivia.

En el hormigón plástico, las puzolanas producirán los mismos efectos físicos que los materiales finamente divididos; sin embargo, como las puzolanas son químicamente reactivas, se obtienen beneficios adicionales. Además de mejorar la trabajabilidad del hormigón, las puzolanas pueden reducir:

- La generación de calor.
- El cambio de volumen por cambios en la temperatura.
- La Exudación.

También se pueden usar para proteger el hormigón contra la expansión destructiva causada por los agregados que reaccionan con los álcalis.

Ciertas puzolanas como la arcilla y la arcilla esquistosa calcinadas aumentan las necesidades de agua, lo que conduce a una mayor contracción por secado y el agrietamiento resultante; como consecuencia, debe tenerse cuidado en su selección y uso.

Las puzolanas influirán en las características siguientes del hormigón:

Reducción de Cemento.- Se puede reemplazar o sustituir parte del cemento Pórtland, por puzolana para obtener una resistencia igual (cementos Tipo IP). La resistencia producida por los aditivos puzolánicos se desarrolla con relativa lentitud, en particular a bajas temperaturas. Por consiguiente, debe continuarse el curado en húmedo durante periodos más largos, para desarrollar la resistencia potencial de ese hormigón. En condiciones favorables de curado, las resistencias últimas del hormigón que contiene puzolanas como reemplazo para parte del cemento serán más altas que las obtenidas sólo con cemento Pórtland.

Control de la reacción álcali-agregado.- Los componentes silíceos de ciertos agregados reaccionarán con los álcalis del cemento Pórtland. El término álcali se refiere al sodio y potasio presentes en pequeñas cantidades y se expresa en los informes y análisis del molino como óxido de sodio equivalente ($\%Na_2O + 0.658*\% K_2O = \%Na_2O_e$). Esta reacción provoca una expansión excesiva, agrietamiento y deterioro general del hormigón. Las pruebas de laboratorio y la experiencia en el campo han indicado que el uso de cementos de bajo álcali (menos del 0.6% de Na_2O_e) o el uso de puzolanas, o ambas cosas, minimizan la reacción álcali-agregado, lo que entonces permite el uso de esos agregados. Las puzolanas varían en su capacidad para controlar la reacción álcali-agregado; por lo tanto, antes de seleccionar una puzolana para este fin, se deben llevar a cabo pruebas para determinar su eficiencia. Las puzolanas que han probado su eficacia en la reducción de la reacción álcali-agregado son algunos ópalos y rocas fuertemente opalinas, las arcillas del tipo de la caolinita,

algunas cenizas muy finas, la tierra de diatomeas y las arcillas calcinadas del tipo montmorillonita.

Desarrollo del calor de hidratación.- Al reducir la cantidad de cemento Pórtland, por metro cúbico de hormigón, por puzolanas, se reducirá el calor total de hidratación. Esto resulta muy conveniente cuando se vacían grandes masas de hormigón, ya que se reduce la temperatura máxima, con la subsiguiente reducción en los esfuerzos térmicos y el agrietamiento al enfriarse.

Esta reducción en la generación de calor puede no ser conveniente cuando se vacían secciones relativamente delgadas en tiempo frío.

La adición de puzolana esta restringida en la NB-011 a un rango entre el 6 y 30% del peso del cemento, en los cementos Tipo I. Por ejemplo en COBOCE se reemplaza 8% del cemento por una puzolana en el cemento IP 40 y el 25% en el IP 30.

Aditivos Colorantes.- A menudo se adicionan pigmentos inertes al hormigón para darle color. Los aditivos colorantes deben ser estables en presencia de los álcalis y no tener efectos adversos sobre las características del hormigón. Estos se encuentran como colores naturales o inertes, o como materiales sintéticos, y se usan en cantidades de entre 2 y 10% en peso del cemento. Deben mezclarse por completo con el cemento seco o la mezcla de cemento seco, antes de la adición del agua. El uso de cemento Pórtland blanco, en lugar del cemento Pórtland gris, siempre dará por resultado colores más limpios.

TABLA 4.3 ADITIVOS COLORANTES ACEPTABLES

Grises a negro	Óxido negro de hierro Negro mineral Negro de humo
Azul	Azul ultramarino Azul de ftalocianina
Rojo brillante a rojo oscuro	Óxido rojo de hierro
Café	Óxido café de hierro Tierra de sombra en bruto o calcinada
Marfil, crema o color piel	Óxido amarillo de hierro
Verde	Oxido de cromo Verde de ftalocianina

Fuente: Referencia 6

Un Colorante muy empleado como pigmento en el hormigón es el Ocre, que es una mezcla natural de oxido férrico, sílice y oxido de aluminio hidratado, cuyo color varia del amarillo al rojo.

Aparentemente, la adición de aditivos colorantes al hormigón no influye sobre la durabilidad, pero es posible que se requiera un aumento considerable sobre la cantidad normal de agente inclusor de aire para producir el contenido deseado de aire en el hormigón.

4.6. RECOMENDACIONES

Ya que el tipo y cantidad de cemento, las modificaciones de la gradación del agregado o la proporción de la mezcla pueden influir sobre la eficiencia del aditivo, resulta conveniente realizar pruebas previas para todos los aditivos con el hormigón que se va a usar en la obra. Como muchos aditivos influyen sobre más de una propiedad del hormigón, a veces de manera adversa, deben realizarse pruebas del aditivo respecto a más de una de las propiedades del hormigón. Como por ejemplo:

1. *Revenimiento*. Método para la prueba de revenimiento del hormigón de cemento Pórtland; NB589; ASTM C143.
2. *Expansión*. Método o prueba para determinar la eficacia de los aditivos minerales para evitar la expansión excesiva del hormigón debida a la reacción álcali-agregado, ASTM C441.
3. *Contenido de aire*. Método de prueba para el contenido de aire del hormigón recién mezclado por el método de la presión; ASTM C231.
4. *Tiempo de fraguado*. Método de prueba para el tiempo de fraguado de mezclas de hormigón por resistencia a la penetración; NB 1003-2; ASTM C403.
5. *Resistencia a la compresión*. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de hormigón; NB639; ASTM C39.
6. *Resistencia a la flexión*. Resistencia a la flexión del hormigón; NB640; ASTM C78.
7. *Resistencia a la congelación y el deshielo*. Sería aplicable cualquiera de los dos métodos siguientes de prueba: ASTM C290-61T o C291-61T.
8. *Cambio de volumen*. Método de prueba para el cambio de volumen del mortero y hormigón de cemento; ASTM C157.

Nota.- Probar el hormigón que contiene aditivos sólo respecto a la resistencia a la compresión puede conducir a la selección de un aditivo indeseable para la finalidad que se pretende. Como ejemplo, un hormigón con alta resistencia a la compresión y mala durabilidad para la congelación y el deshielo sería indeseable para la construcción de carreteras. Un hormigón con alta resistencia a la compresión y elevada contracción por secado sería indeseable para usarse en la mayor parte de las estructuras. La evaluación se debe hacer sobre el efecto total del aditivo sobre todas las características necesarias para el hormigón, en relación con su uso final.

A continuación se dan algunos consejos sobre el uso de aditivos:

- En los hormigones armados o pretensados se tendrá cuidado al utilizarse como aditivos el cloruro de calcio y en general productos en cuya composición intervengan cloruros, sulfuros, sulfitos u otros componentes químicos ya que pueden ocasionar o favorecer la corrosión de las armaduras. Con respecto a los cloruros se cumplirá los límites establecidos por las normas (tabla 4.4).

- Como norma general, es aconsejable utilizar solamente aquellos aditivos cuyas características (y especialmente su comportamiento al emplearlos en las proporciones previstas) vengan garantizadas por el fabricante. No obstante, debe tenerse en cuenta que el comportamiento de los aditivos varía con las condiciones particulares de cada obra; tipo y dosificación de cemento, naturaleza de los áridos, etc. Por ello es imprescindible la realización de ensayos previos en todos y cada uno de los casos. Se deberá obtener toda la información precisa en relación con las características de los aditivos y su influencia sobre el hormigón y su armadura.
- Se deberá conocer la dosificación recomendada; los efectos perjudiciales de una dosificación demasiado baja o demasiado elevada; la presencia eventual de productos perjudiciales (por ejemplo, cloruros) y, en su caso, el contenido de éstos; las condiciones en que debe efectuarse su almacenamiento, la duración máxima admisible de éste, etc., ya que la aplicación inadecuada puede provocar efectos contrarios a los requeridos. En general, los aditivos se usan en cantidades relativamente pequeñas. Por lo tanto, en la mayor parte de los casos, es importante que se use un equipo dosificador adecuadamente exacto.
- Los aditivos deberán transportarse y almacenarse de forma que su calidad no resulte afectada por influencias físicas o químicas, para esto las condiciones de almacenamiento y utilización deben aparecer claramente especificadas en los correspondientes envases, o en los documentos de suministro, o en ambos.
- Si se va a utilizar dos o más aditivos simultáneamente (ej. un aditivo reductor de la cantidad de agua y uno inclusor de aire), en un mismo hormigón, y existen dudas sobre su compatibilidad, es recomendable revisar los componentes, consultar a los fabricantes o con los distribuidores.
- En ninguna condición, debe permitirse que dos aditivos de tipos diferentes se mezclen entre sí, antes de su adición a la mezcladora

En el anexo 1 se presentan las dosificaciones y modo de uso para los distintos aditivos de la línea SIKA.

TABLA 4.4 RECOMENDACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES MÁXIMAS DEL IÓN CLORURO, EN PORCENTAJE EN PESO DEL CEMENTO*

TIPO DE OBRA	EHE	ACI 318-89
Obras de Hormigón Pretensado	0,2	0.06
Obras de Hormigón Armado u obras de Hormigón en Masa que contenga armaduras para reducir la fisuración	0,4	0.30
Hormigón Reforzado expuesto a cloruros en servicio	-	0.15
Hormigón Reforzado que se secará en servicio	-	1.00

* El porcentaje total aportado por todos los materiales

Fuente: Elaboración Propia

4.7. RESUMEN

TABLA 4.5 EFECTOS PRINCIPALES DE LOS ADITIVOS.

Aditivo	Efectos Principales
Plastificantes	Reducción de la necesidad de agua y/o mejoramiento de la trabajabilidad
Super-plastificantes	Pronunciada reducción de la necesidad de agua y/o mejoramiento de la trabajabilidad para la obtención de un hormigón fluido.
Inclusores de aires	Producción y dispersión de minúsculas burbujas de aire en la masa del hormigón para una mejor resistencia al hielo/sales anti-hielo.
Retardadores	Demora en el inicio del fraguado del hormigón
Aceleradores	Aceleración del fraguado y del endurecimiento del hormigón, sobre todo a bajas temperaturas.

Fuente: referencia 7

TABLA 4.6 CLASIFICACIÓN DE LOS ADITIVOS PARA HORMIGÓN

Tipo de Aditivo	Efecto Deseado	Componentes
Aceleradores (ASTM C 494)	Acelerador el fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial.	Cloruro de calcio (ASTM D98), Tetranolamina, Tiocianato de sodio, Formiato de calcio, nitrito de calcio, nitrato de calcio.
Inclusores de Aire (ASTM C 260)	Mejoran la durabilidad a la congelación y el deshielo, descongelantes, sulfatos y ambientes álcali reactivos. Mejoran la trabajabilidad.	Sales o resinas de madera (resina Vinsol), algunos detergentes sintéticos, sales de sulfonato de lignina, sales de ácidos de petróleo, sales de material protéico, ácidos grasos y resinosos y sus sales, sulfatos alquilbenzenos, sales de sulfonatos hidrocarburos.
Aditivos Colorantes (ASTM C 979)	Dan color al Hormigón	Ver tabla 4.3
Formadores de Gas (Expansores)	Causan expansión antes del fraguado.	Polvo de Aluminio.
Reductores de la Permeabilidad (impermeabilizantes)	Disminuyen la permeabilidad.	Latex. Estearato de Calcio.
Retardadores (ASTM C 494)	Retardar el tiempo de fraguado.	Lignita. Borax. Azúcares. Ácidos y sales tartáricos.
Reductores de Encogimiento.	Reducen el encogimiento por secado.	Alcali éter polialcalino. Glicol propileno.
Super plastificante (ASTM C 1017)	Incrementa la fluibilidad del hormigón. Reduce la relación A/C	Sulfonato melamina formaldehida condensadas. Sulfonato naftalina formaldehida condensadas. Lignosulfonato. Policarboxilato.
Reductor de agua (plastificante) (ASTM C 494)	Reducen el contenido de agua, por lo menos, en un 5%.	Lignosulfonato. Ácidos Hidroxilado carboxílico. Carbohidratos. (También tienden a retardar el fraguado, por lo que por lo general se adicionan aceleradores)

Fuente: referencia 9

BIBLIOGRAFÍA

1. NB 1000:2000 Aditivos para la Construcción - Definiciones y Clasificación.
2. NB 1001:2000 Aditivos para la Construcción – Requisitos.
3. ACI 212.3R-91 Chemical Admixtures for Concrete.
4. EHE (Instrucción de Hormigón Estructural) Artículo 29, Otros Componentes del Hormigón,
http://www.mfom.es/cph/norma_ehe.html.
5. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) “Hormigón Armado”. 14ª ed., Gustavo Pili, SA, Barcelona.
6. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) “Manual de la Construcción con Concreto”. 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
7. <http://www.construaprende.com>.
8. <http://www.sikabolivia.com>.
9. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association “Design and Control of Concrete Mixtures”. 14ª ed., www.portcement.org
10. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

CAPITULO 5

ACEROS

5.1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material por naturaleza frágil, fuerte a la compresión pero débil a la tensión y sin resistencia a la tracción (ductilidad), por lo que no puede ser empleado en piezas que han de trabajar a flexo-tracción. Por otra parte, las barras de acero, son fuertes a la tensión y bastante dúctiles. Por ello las piezas de hormigón que van a trabajar a tracción o flexión se refuerzan con barras de acero en la zona sometida a estos esfuerzos, de modo que el refuerzo absorba las cargas de tensión, en tanto que el hormigón soporte las de compresión. Este concepto de construcción con hormigón reforzado conduce a miembros estructurales que no sólo son mucho más fuertes que los fabricados con hormigón simple, sino que también poseen la ductilidad de la que carecen estos.

Dado que en nuestro país no se produce acero estructural, los aceros utilizados siguen las normas existentes de sus países de producción (Brasil, Perú, Argentina, etc.). Es por eso que dentro del texto se hará referencia a algunas de estas normas en donde sea pertinente.

5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS

5.2.1. SEGÚN SU COMPOSICIÓN QUÍMICA

Los elementos principales, en la composición química de los aceros, son: hierro, carbono, manganeso, fósforo, azufre y silicio. Las variaciones en los porcentajes de estos elementos son factores determinantes en las características y tipos de los aceros.

En las barras de acero para hormigón armado, el contenido de fósforo no deberá exceder del 0.06% de su peso (NB 728)

La clasificación de los aceros de acuerdo a su composición química según la NB 266 es la siguiente:

- **Aceros al Carbono:** aquellos aceros en los que está presente el Carbono y los elementos residuales, como el Manganeso, Silicio, Fósforo y Azufre, en cantidades consideradas como normales.
- **Aceros de baja aleación:** aquellos aceros en que los elementos residuales están presentes arriba de cantidades normales, o donde están presentes nuevos elementos aleantes, cuya cantidad total no sobrepasa un valor determinado (normalmente un 3,0 al 3,5%). En este tipo de acero, la cantidad total de elementos aleantes no es suficiente para alterar la microestructura de los aceros resultantes, así como la naturaleza de los tratamientos térmicos a que deben ser sometidos.

- **Aceros de alta aleación:** aquellos aceros en que la cantidad total de elementos aleantes es como mínimo 10%. En estas condiciones, no sólo la microestructura de los aceros correspondientes puede ser profundamente alterada, sino que igualmente los tratamientos térmicos comerciales sufren modificaciones, exigiendo técnicas y cuidados especiales.
- Como en nuestro medio, comercialmente, solo se encuentran en el mercado aceros al carbono, a continuación se realizara un mayor desarrollo de estos.

5.2.1.1. ACEROS AL CARBONO

Los aceros al Carbono comunes, simplemente laminados y sin ningún tratamiento térmico, son plenamente satisfactorios y constituyen un porcentaje considerable dentro de los aceros estructurales.

Los requisitos fundamentales que deben cumplir estos aceros, son los siguientes:

- Ductilidad y homogeneidad.
- Valor elevado de la relación resistencia mecánica / límite de fluencia.
- Soldabilidad.
- Apto para ser cortado por llama, sin endurecimiento.
- Razonable Resistencia a la corrosión.

Con excepción de la resistencia a la corrosión, todos los otros requisitos son satisfechos en mayor o menor grado, por los aceros al Carbono de bajo a medio contenido de Carbono, que son obtenidos por laminación y cuyos límites de resistencia varían de 400 a 500 MPa y alargamientos que están en torno al 20%. La ductilidad de estos aceros garantiza una excelente trabajabilidad en operaciones como el corte y doblado, sin que se originen fisuras u otros defectos.

El límite de fluencia, así como el módulo de elasticidad, son las características del acero que se utilizan en el proyecto y el cálculo de una estructura. La soldabilidad por otra parte, es otra característica muy importante en este tipo de material de construcción. Los aceros al Carbono comunes también satisfacen este requisito, pues pueden ser soldados sin alterar su microestructura.

Finalmente, la resistencia a la corrosión sólo es alcanzada por la adición de pequeñas cantidades de cobre.

TABLA 5.1 CLASIFICACION SEGÚN LA NORMA BOLIVIANA NB 728

Según características Mecánicas	Barras lisas $f_y = 215 \text{ MPa}$ Barras corrugadas f_y según tabla 5.3	
Según grado de resistencia	De mediana resistencia, barras lisas. De alta resistencia, Barras corrugadas.	No cumplen las condiciones de adherencia indicadas para las barras corrugadas
Según proceso de fabricación	Laminado en frío Laminado en caliente	

Fuente: Referencia 3

5.3. METODOS PARA ELEVAR EL LIMITE DE FLUENCIA

Los aceros de alta resistencia nacen de la idea de elevar el límite de fluencia del acero ordinario, ganando resistencia, a igualdad de peso, en mayor proporción de lo que aumenta su costo de fabricación, estos aceros se utilizan como aceros estructurales en la construcción.

La elevación del límite de fluencia se puede conseguir por dos procedimientos distintos:

1. Mediante una adecuada composición química del acero, se eleva la proporción de carbono a la vez que se añaden cantidades adecuadas de otros elementos, obteniéndose los aceros llamados de dureza natural, que se laminan en caliente (ej. Belgo CA50)
2. Mediante tratamientos físicos posteriores a la laminación, se estiran y retuercen en frío barras de acero ordinario, o de acero de dureza natural, elevándose así las características resistentes, se obtienen los aceros endurecidos por deformación en frío (ej. Belgo CA60). Según la norma brasilera deben ser de diámetro menor a 10mm. A estos se suele denominar como hilos o alambre.

La diferencia de ambos tipos se pone en manifiesto en el diagrama tensión-deformación. Los aceros de dureza natural conservan el escalón de cedencia (figura. 5.10 a), tanto más corto cuanto, más resistentes son; como se puede ver en la figura 5.10 b, los endurecidos en frío pierden dicho escalón, mostrando un diagrama curvilíneo continuamente creciente hasta la rotura.

5.4. ACERO DE REFUERZO PARA HORMIGÓN ARMADO

Las formas principales que toma el refuerzo estándar para hormigón son: barras lisas, barras corrugadas, malla de alambre soldado, fibras de acero, torones, hilos y barras para preesforzar.

5.4.1. BARRAS LISAS (NB 730)

Las barras redondas lisas de acero constituyeron la primera forma de refuerzo. En la actualidad han sido desplazadas por las barras corrugadas, pero todavía se usan como espirales de columnas, como pasadores de juntas de pavimentos de hormigón (figura 5.1) y en la fabricación de parrillas.



FIGURA 5.1 Pasadores de Juntas, en una losa de pavimento rígido.

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia

5.4.2. BARRAS CORRUGADAS (NB 732)

Las barras corrugadas estándar de refuerzo son laminadas en caliente o en frío con estrías o resaltes que sobresalen. Estas corrugaciones sirven para aumentar la adherencia y eliminar el deslizamiento entre las barras y el hormigón. Las Normas estandarizan los tamaños y corrugaciones de las barras modernas para refuerzo, fijando ciertos requisitos específicos mínimos para el espaciamiento y altura de las corrugaciones, así como las aberturas permisibles en estas últimas. En la figura 5.2 se muestra una barra corrugada típica de acero para refuerzo con las características consideradas por la Norma Brasileira.

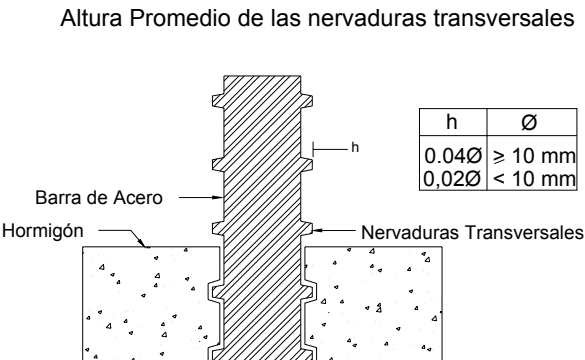
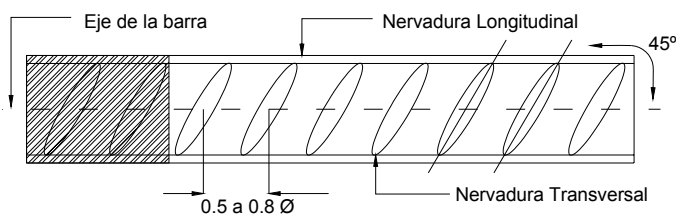


FIGURA 5.2 Características de las Barras Corrugadas

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 21

Las barras corrugadas son utilizadas como acero de refuerzo para estructuras de hormigón armado en general, utilizadas en todos los elementos estructurales y, para soportar todos los esfuerzos que sobrepasan la resistencia del hormigón simple (ej. Corte, tracción).

En la figura 5.3 se muestran la manera en que deben venir identificadas las barras de acero. En medio de las corrugaciones deben estar grabados:

Fabricante / Diámetro plg ó mm / Grado (límite de fluencia en $\text{Kgf/mm}^2 = \text{MPa}/10$ ó en Mlb/plg^2)

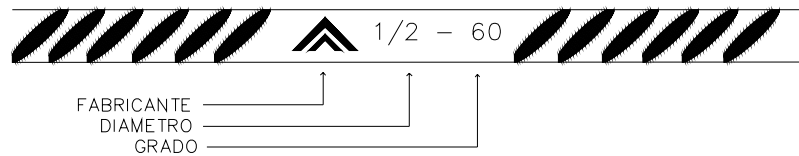


FIGURA 5.3 Identificación de las barras de acero

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 22

5.4.3. MALLA DE ALAMBRE SOLDADO (MALLAS ELECTROSOLDADAS) (NB 733 y NB 734)

La malla de alambre soldado es el producto formado por dos sistemas de elementos que se cruzan entre sí perpendicularmente y cuyos puntos de contacto están unidos mediante soldadura eléctrica.

Se utiliza en donde se requiere un refuerzo más ligero, como pavimentos de hormigón, vías de acceso a estacionamientos, aceras, piscinas, estanques y losas delgadas para pisos (como las que se usan en la construcción con viguetas pretensadas), muros de contención, revestimientos de túneles, tuberías de hormigón, y otros, donde por lo general es más económico usar malla de alambre soldado que colocar barras separadas de refuerzo.

La malla de alambre soldado consta de alambres de acero laminados en frío, longitudinales y transversales, dispuestos de manera que formen una malla cuadrada o rectangular. En la figura 5.4 se muestra el aspecto de la malla resultante.

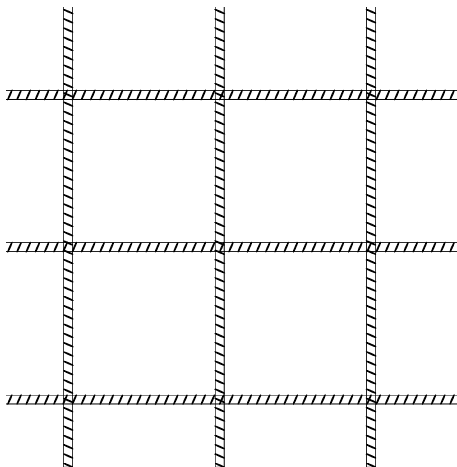


FIGURA 5.4 Malla de alambre soldado

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 22

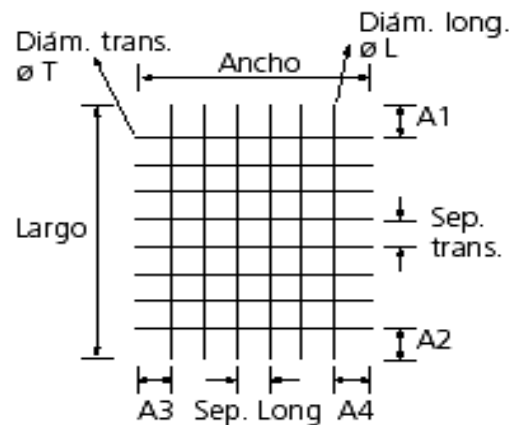


FIGURA 5.5 Plano Esquemático

Fuente: Referencia 22

Las mallas pueden ser en **“Una Dirección”**, cuando el alambre longitudinal es el que proporcionará el refuerzo necesario, y el transversal, que es meramente constructivo, tiene la mínima sección. En los casos en que se proporciona un refuerzo significativo, tanto en la dirección transversal como en la longitudinal, la malla se conoce como en **“Dos Direcciones”**.

Los alambres para las mallas pueden ser desde un diámetro de 4mm hasta un máximo de 10mm. Y las separaciones desde 10cm hasta 25cm.

En nuestro medio, comercialmente, se encuentran sólo mallas con la misma separación y diámetro en ambas direcciones. Pero, si se requiere, se pueden hacer pedidos según especificaciones.

Las variables necesarias para definir una malla según especificación son: Largo y ancho del panel¹, Salientes (A1, A2, A3, A4) y Cuantía (diámetros y separaciones) (figura 5.5).

Las ventajas y beneficios son:

- Permite reforzar grandes áreas en forma ligera, con una necesidad mínima de supervisión e inspección.
- Permiten una distribución uniforme de los esfuerzos.
- Mayor rapidez en la ejecución. Listas para colocar, eliminando así las tareas de corte, doblado y atado de barras.
- Máxima adherencia, debido a su conformación nervada.
- Menor consumo de acero. Logrando ahorros de hasta un 15%.
- La soldadura de todas sus uniones asegura el exacto posicionamiento de las barras y mejora las longitudes de empalme.
- Fácil transporte.

5.4.4. FIBRA DE ACERO (ACI 544-1R)

En el ámbito de la tecnología del hormigón, en los últimos años, se han realizado numerosas investigaciones para mejorar sus características. Con la adición de la fibra de acero el hormigón se convierte en un material de construcción que nos permite innovar gracias a su mejor ductilidad, permitiendo una mayor absorción de energía de deformación y una elevada resistencia a la rotura (tracción por flexión, índice de tenacidad) y al impacto, mejorando sus características reológicas y mecánicas.

5.4.4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS

Fabricadas a partir de alambre trefilado, de acero bajo en carbono y caracterizadas por su elevado límite elástico (800-1500 MPa), y en ciertos casos pueden llegar a permitir sustituir por completo el armado tradicional del hormigón a base de mallas y acero corrugado.

¹ Malla electrosoldada de longitud y ancho determinados.

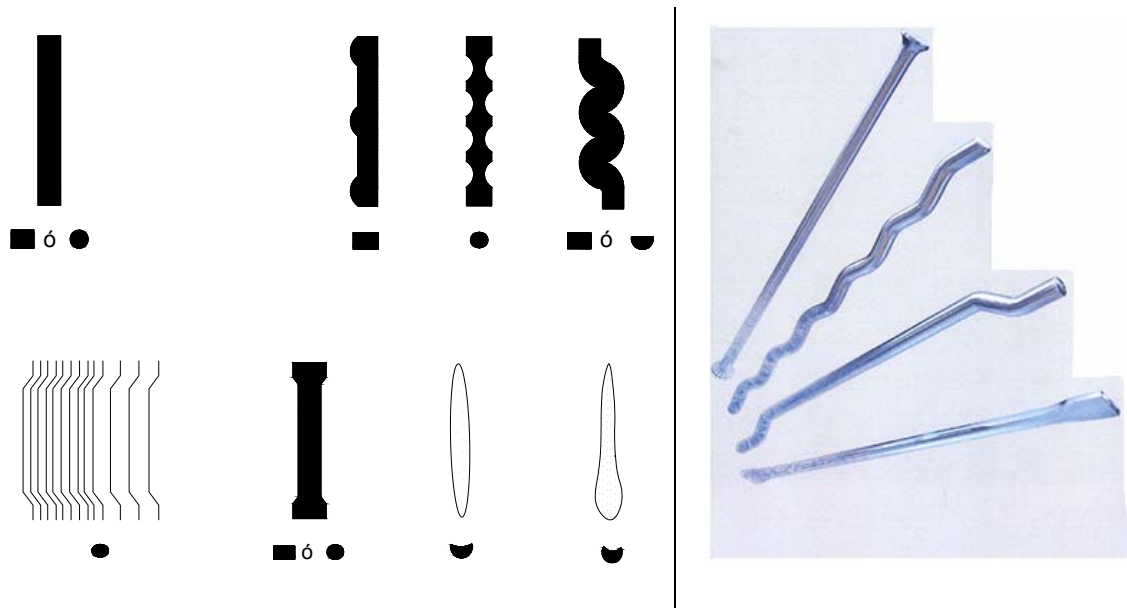


FIGURA 5.6 Diferentes geometrías para fibras de acero

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 12

Según la aplicación se pueden requerir diversas composiciones de la fibra, y por ello las fibras de acero son producidas por diferentes métodos y en distintas formas, como se muestra en la figura 5.6.

La resistencia de la fibra y la capacidad de las fibras de enlazarse con el hormigón son características importantes de la fibra de refuerzo. La resistencia mínima a la tracción, de las fibras, requerida por la ASTM A820, es de 345 MPa.

5.4.4.2. ADICIÓN DE LAS FIBRAS EN EL HORMIGÓN

Las fibras pueden ser añadidas de forma manual o automática, tanto en la planta de hormigón como a pie de obra. Estas se pueden añadir luego de que todos los otros ingredientes han sido añadidos, o con los agregados, antes de que estos sean añadidos a la mezcla. Es importante tener una buena dispersión de las fibras, para evitar segregación de estas.

5.4.4.3. APLICACIONES Y VENTAJAS

La fibra de acero para el hormigón, puede ser empleada en los siguientes sectores: pavimentos de aeropuertos y autopistas, estructuras hidráulicas, Hormigón lanzado, elementos prefabricados, etc.

Las características más significativas del *Hormigón Reforzado con Fibra de Acero* (HRFA) son la capacidad para absorber energía después de agrietarse, la resistencia al impacto, y resistencia a la fatiga por flexión. Por esta razón, el HRFA ha encontrado muchos usos en losas planas donde están sometidas a altas cargas e impacto.

La incorporación de fibras en el hormigón, ofrece las siguientes ventajas:

- Ahorros de material, debido a la reducción del espesor de losas.

- Disminución de los tiempos de obra, en relación al armado con armadura tradicional.
- Mayor control de la fisuración ya que cosen las fisuras del hormigón formando un “puente” entre los agregados gruesos, llevando al hormigón a un comportamiento dúctil luego de la fisuración inicial evitando así la fractura frágil.
- Incremento de la resistencia a la abrasión y protección final debido a una reducción de la fisuración.
- Excelente resistencia a la corrosión, ya que mediante el uso de las fibras las fisuras controladas tienen un diámetro mucho menor al necesario para permitir que el proceso de corrosión se inicie en el acero del hormigón.
- Excelente resistencia al impacto (mejora la resiliencia).
- Mejora la resistencia a tracción, compresión, flexión y corte.
- Gran capacidad para soportar cargas.
- Control eficaz de la retracción del hormigón.
- Ductilidad.
- Mejora el comportamiento y estabilidad de las juntas.
- Permite reducir el número de juntas de retracción.

A medida que se gana más experiencia con hormigón reforzado con fibra de acero (HRFA), más usos son aceptados por la comunidad de ingenieros.

Para ver información sobre fibras de otros materiales, referirse al apartado 20.6.

5.4.5. ACERO PARA PREESFORZADO

Para llevar a cabo lo que acaba de describirse en la práctica real, se requiere un acero de resistencia extremadamente alta. El preesfuerzo es el único método en el que se pueden utilizar de modo eficaz estos tipos de aceros para reforzar una estructura de hormigón.

El acero que se usa para presforzar el hormigón se puede dividir en tres clases: torones, hilos y barras. En todos los casos, el acero para presforzado debe tener una resistencia considerablemente más alta que la de las barras estándar para refuerzo del hormigón.



FIGURA 5.7 Vigas postensadas

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia



FIGURA 5.8 Vaina para postensado, embebidas en una viga, antes del vaciado

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia

Hilo para Presforzado (ASTM A421).- Se fabrica por un proceso de estirado en frío. El proceso de estirado reduce el diámetro y aumenta la resistencia a la tensión del hilo. La resistencia del hilo se incrementa por el trabajo en frío de cada estirado; en consecuencia, entre menor sea el diámetro del hilo final, mayor es su resistencia última. Para mejorar las propiedades físicas del hilo, se somete a un tratamiento térmico continuo con un control preciso.

Los hilos para presforzado, según la ASTM 421, tienen una resistencia máxima a la tensión de 1620 MPa y 1725 MPa.

Torón para Presforzado (ASTM A416).- Es un cable formado por varios hilos para presforzado que se han torcido juntos. Los torones para presforzado constituyen la forma más popular del acero para este fin. Casi en todos los casos, los torones que se emplean para pretensar son de siete hilos, en los que seis hilos se tuercen helicoidalmente en torno a un séptimo hilo recto.

El torón de siete hilos está disponible en dos grados según la ASTM 416: grado 250 (resistencia máxima a la tensión de 1725 Mpa,) y grado 270 (resistencia máxima a la tensión de 1860 Mpa).

Barras de alta Resistencia (ASTM 722).- Para usarse en el hormigón presforzado postensado, existen barras de acero de aleación, de alta resistencia, en la forma lisa (tipo I) o corrugado (tipo II), en diámetros que van desde $\frac{5}{8}$ " (tipo I) o $\frac{3}{4}$ " (tipo II) hasta $1\frac{3}{8}$ ". Las barras se fabrican a partir de barras redondas de acero de alta aleación laminado en caliente que se tratan térmicamente y, a continuación, se alargan en frío al cargarlas con no menos del 80% de su resistencia última mínima a la tensión. Al alargar en frío se produce una alta resistencia en el punto de fluencia.

Las barras de alta resistencia, según la ASTM 722, tienen una resistencia máxima a la tensión de 1035 MPa.

5.4.5.1. HORMIGÓN PREESFORZADO

El hormigón se puede presforzar, ya sea pretensando (antes de vaciar) o postensando (después del vaciado), de modo que la aplicación de las cargas de servicio harán que la tensión actuara sólo para aliviar la precarga de compresión. Una simplificación extrema de lo anterior es el sencillo caso de levantar una fila de libros como una viga. Si se aplica suficiente presión al oprimir los extremos de la fila de libros entre sí, las fuerzas de compresión entre los libros contrarrestan las fuerzas de tensión establecidas por la acción de flexión y, en efecto, esos libros soportarán su propio peso como una viga. Si se precargan las barras estándar de refuerzo por la aplicación de fuerzas de tensión a las mismas y se mantienen esas cargas en tanto fragua el hormigón que se vacía entre ellas, el miembro de hormigón presforzado que se obtiene podrá soportar cargas de "tensión" apreciables, de la misma manera que la fila de libros.

En general el pretensado se lleva a cabo sólo en plantas fijas de elementos prefabricados.

El postensado se puede aplicar en elementos prefabricados (figura 5.7) o vaciados *in situ*. Para realizar el postensado es necesario suministrar un medio, antes del vaciado del elemento, para evitar que el acero a postensar se adhiera al hormigón antes de tensar, a este medio se denominan “vainas”, que pueden ser de metal o plástico (figura 5.8).

5.5. DIÁMETRO NOMINAL Y DIÁMETRO EQUIVALENTE

La forma de designar una barra corrugada estándar es por su diámetro en milímetros, este se conoce como *Diámetro Nominal*, este se utiliza para la comercialización del acero, y para el diseño estructural. Es respecto a este que se establecen las tolerancias, se determina el área, perímetro, etc.

El *Diámetro Equivalente* de una barra corrugada es el área que tendría una barra de la misma longitud y peso, pero, de sección constante (sin corrugaciones). Esta expresada en cm^2 y se calcula con la ecuación E 5.1:

$$Seccion_Equivalente[\text{cm}^2] = \frac{Peso[\text{Kg}]}{0.785 * Longitud[\text{m}]} \quad (\text{E 5.1})$$

La determinación del *Diámetro Equivalente* de una barra, toma importancia cuando se requiera comprobar que la barra que se este adquiriendo o utilizando no tenga un valor de *Diámetro Equivalente* menor que el *Diámetro Nominal* asignado o que esta diferencia no sea en gran medida. Esta comprobación se debe realizar, además, cuando luego de un almacenamiento prolongado, la barra haya sufrido corrosión tal que su sección transversal haya sido disminuida, y puede que ya no sea prudente utilizarla.

El diámetro equivalente debe ser mayor que el diámetro nominal o cumplir con lo siguiente: según la norma española esta diferencia debe ser menor al 4.5%, y según la Norma Brasileira este debe ser menor al 10% para barras de 6 a 9.5mm y al 6% para barras de 12 a 32mm. Esta determinación debe realizarse después de limpiar la barra cuidadosamente, para eliminar las posibles escamas de laminación y el óxido no adherido firmemente.

En la tabla 5.1 se muestran las dimensiones nominales de especificación para barras de refuerzo, ya sean corrugadas o lisas, y en la tabla 5.2 se listan los grados estándar para las barras de refuerzo que se usan en la actualidad, Así como los diámetros proporcionados las marcas existentes en nuestro mercado.

En Bolivia los diámetros nominales que se encuentran en el mercado son:

TABLA 5.2 DIAMETRO, PESO NOMINAL Y SECCIÓN NOMINAL DE LOS ACEROS

Diámetro Nominal ^a (mm)	Nomenclatura EE. UU. ^b	Diámetro en pulg.	Peso Nominal por metro ^c (Kg/m)	Diámetro Nominal (cm ²)
6	2	$\frac{1}{4}$	0.222	0.283
8	-	$\frac{5}{16}$	0.395	0.503
9.5	3	$\frac{3}{8}$	0.556	0.710
10	-	-	0.620	0.790
12	4	$\frac{1}{2}$	0.888	1.131
16	5	$\frac{5}{8}$	1.578	2.011
20	6	$\frac{3}{4}$	2.466	3.142
25	8	1	3.853	4.909
32	10	$1\frac{1}{4}$	6.313	8.042

^aPara evitar confusiones en obra se recomienda utilizar el menor número posible de diámetros distintos y que estos diámetros se diferencien al máximo entre sí.

^bSe presenta además la nomenclatura norteamericana, ya que es utilizada en gran cantidad de libros que utilizan la norma ACI que designa las barras por medio de números, estos se basan en el número de octavos de pulgada de su diámetro nominal. Por ejemplo la barra N°5 tiene un diámetro nominal de $\frac{5}{8}$ ".

^cEl peso por metro de una barra es igual para barras lisas y corrugadas con el mismo diámetro nominal, por tanto la tabla 5.1, se utiliza indistintamente para ambos tipos de barras.

Fuente: Elaboración Propia

Comúnmente, las barras más grandes, de 32 y 40mm, no se encuentran en el mercado pero si se requirieran se pueden hacer el pedido. En la mayor parte de las construcciones, en donde se requieren unos cuantos elementos con mucho refuerzo, los códigos de construcción permiten el uso de empaques de varias barras más pequeñas (figura 5.9).

TABLA 5.3 GRADOS Y DIÁMETROS DE MARCAS EXISTENTES EN EL MERCADO.

Diámetro nominal ^a (mm)	Belgo (Brasil)		Acindar (Argentina)	Arequipa (Perú)
	500* MPa	600** MPa	420* MPa	420* MPa
4.2		✓		
5		✓		
6	✓	✓	✓	✓
7		✓		
8	✓	✓	✓	✓
9.5	✓	✓		✓
10			✓	
12	✓		✓	✓
16	✓		✓	✓
20	✓		✓	✓
25	✓		✓	✓
32	✓		✓	
40			✓	

* laminado en caliente

** laminado en frío (se denominan hilos o alambres)

Fuente: Elaboración Propia.

En el anexo 8 se muestran los rangos de tensión de las marcas de acero mencionadas en la tabla 5.2

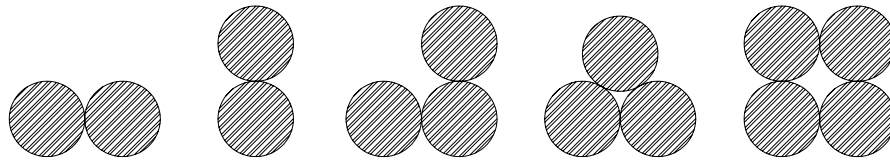


FIGURA 5.9 Tipos de empaques permitidos por la ACI.

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 15

En el caso de utilizar empaques se deben seguir los siguientes requerimientos:

- Estas deben estar circundadas por estribos o cercos (los esribos cumplen una funcion estructural, los cercos son solo constructivos).
- En elementos sujetos a flexión cada una de las barras de los paquetes que se corten en el tramo, deben terminar en puntos distintos, de forma escalonada, y separados a una distancia de por lo menos a 40 veces el diámetro ($40 \cdot \varnothing$).
- Solo son consideradas empaques los mostrados en la figura 5.9.
- Para espaciamiento y recubrimiento de hormigón (donde se pida el diámetro de la barra) una empaquetadura debe ser considerada como una barra simple con un diámetro equivalente al diámetro obtenido de la suma de las áreas de las barras empaquetadas.
- En vigas las barras mayores a $\varnothing 35$ no se deben empaquetar

5.6. PROPIEDADES DEL ACERO

5.6.1. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.

- **Ductilidad**, es la elongación que sufre la barra cuando se carga sin llegar a la rotura. Las especificaciones estipulan que el estiramiento total hasta la falla, no sea menor que cierto porcentaje mínimo (tabla 5.3) que varía con el tamaño y grado de la propia barra (apartado 5.7.1).
- **Dureza** se define como la propiedad del acero a oponerse a la penetración de otro material (apartado 5.7.2).
- **Resistencia a la tensión**, Es la máxima fuerza de tracción que soporta la barra, cuando se inicia la rotura, dividida por el área de sección inicial de la barra. Se denomina también, más precisamente, carga unitaria máxima a tracción (apartado 5.7.1).
 - **Limite de fluencia, f_y** .- Es la tensión a partir de la cual el material pasa a sufrir deformaciones permanentes, es decir, hasta este valor de tensión, si interrumpimos el traccionamiento de la muestra, ella volverá a su tamaño inicial, sin presentar ningún tipo de

deformación permanente, esta se llama deformación elástica. El ingeniero utiliza el límite de fluencia de la barra para calcular la dimensión de la estructura, pues la barra soporta cargas y sobrecargas hasta este punto y vuelve a su condición inicial sin deformación. Pasado este punto, la estructura está fragilizada y comprometida.

En general, en el caso de los aceros de dureza natural, el límite de fluencia coincide con el valor aparente de la tensión correspondiente al escalón de cedencia (figura 5.10 a). En los casos en que no aparece este escalón o aparece poco definido, como suele ocurrir con los aceros estirados en frío, es necesario recurrir al valor convencional establecido en las prescripciones, como se explica más abajo, para aceros de resistencia mayor a 4200 Kg/cm².

Las barras con resistencias hasta 2800 Kg/cm² presentan una curva elasto-plástica, como se ve en la figura 5.10 a), entonces f_y se identifica con claridad.

Para aceros de resistencias mayores, hasta 4200 Kg/cm², la curva esfuerzo-deformación unitaria puede ser elasto-plástica o no, dependiendo de las propiedades del acero y del proceso de fabricación.

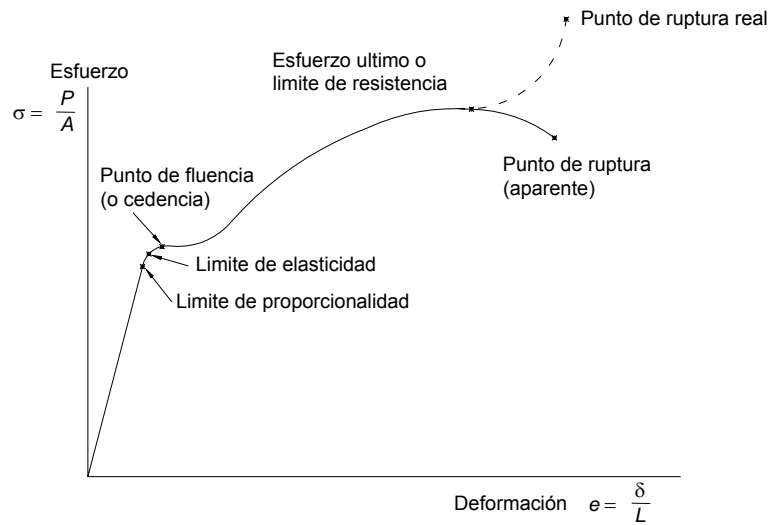
Para aceros de resistencias mayores a 4200 Kg/cm², donde el grado de fluencia no está definido, el código ACI especifica que el esfuerzo de fluencia, f_y , debe determinarse como el esfuerzo que corresponde a una deformación de 0.0035 cm/cm, tal como se muestra en la figura 5.11.

Probablemente, la resistencia en el punto de fluencia, es decir, el esfuerzo elástico máximo que puede soportar la barra, es la propiedad mecánica más importante para el diseñador.

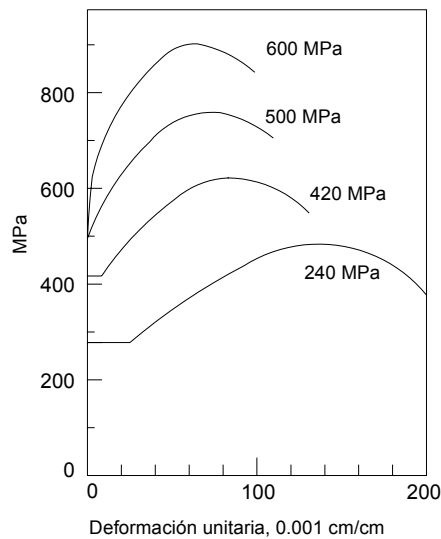
La resistencia a la tensión se controla por un límite sobre la resistencia en el punto de fluencia y esta no puede ser menor que 1.25 veces la resistencia real en el punto de fluencia.

Si bien la tendencia actual, en la construcción con hormigón reforzado, es hacia el uso de barras de refuerzo con grado de resistencia más elevado, dado que el uso de estas conduce a una reducción significativa del tonelaje de acero y del tamaño de los miembros estructurales de hormigón, lo que da por resultado economía en la mano de obra y en otros materiales, se tiene un límite práctico sobre cuán fuerte debe ser el acero de refuerzo utilizado en una construcción estándar de Hormigón armado: Todas las resistencias del acero tienen aproximadamente la misma elongación para el mismo esfuerzo de tensión aplicado (mismo módulo de elasticidad $E_s=2.1 \cdot 10^6$ Kg/cm²). Si un acero tiene una resistencia en el punto de fluencia que es el doble de la de otro, puede aplicarse el doble de

esfuerzo, pero se obtendrá el doble de elongación. Con cargas moderadas, el refuerzo de acero se estirará casi lo mismo que lo que puede estirarse el hormigón que lo rodea sin agrietarse severamente; si se aplica más carga, el acero puede soportar la carga con seguridad, pero el hormigón que lo cubre se agrietará. Esto no sólo da mal aspecto sino que, en general, permitirá la corrosión del refuerzo.



a



b

FIGURA 5.10 a) Diagrama Esfuerzo Deformación para Aceros de Dureza Natural Laminados en Caliente; b) curvas típicas esfuerzo-deformación unitarias para barras de refuerzo

Nota: Las curvas están indicadas según su límite de fluencia

Fuente: a) Elaboración Propia en base a la Referencia 20; b) Elaboración Propia en base a la Referencia 19

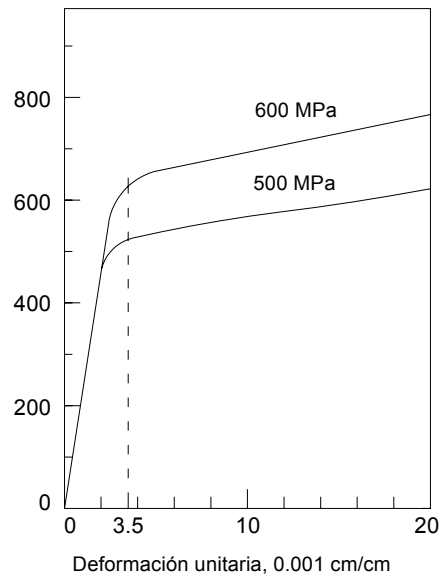


FIGURA 5.11 Diagrama Esfuerzo Deformación para Aceros de resistencia mayor a 4200 kg/cm²

Nota: Las curvas están indicadas según su límite de fluencia

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 19

En general, no se puede usar la mayor resistencia de los aceros con resistencias en el punto de fluencia de 4200 Kg/cm², como refuerzo estándar a la tracción, sin causar el agrietamiento del hormigón, a menos que se tomen disposiciones especiales en el diseño del miembro.

- **Maleabilidad**, es la capacidad que presenta el acero de soportar la deformación, sin romperse, al ser sometido a un esfuerzo de compresión.
- **Tenacidad**, viene siendo la conjugación de dos propiedades: ductilidad y resistencia. Un material tenaz será aquel que posee una buena ductilidad y una buena resistencia al mismo tiempo.
- **Fatiga**, cuando un elemento estructural se somete a cargas cíclicas, este puede fallar debido a las grietas que se forman y propagan, en especial cuando se presentan inversiones de esfuerzos, esto es conocido como falla por fatiga, que puede ocurrir con esfuerzos menores a la carga de deformación remanente.
 - **Límite de fatiga**. Se evalúa en un diagrama Esfuerzo máximo (resistencia ala fatiga) vs. el número de ciclos hasta la falla, estos diagramas indican que la resistencia a la fatiga, de un acero estructural, decrece con un aumento de número de ciclos, hasta que se alcanza un valor mínimo que es el Límite de Fatiga. Con la tracción considerada como positiva y la compresión negativa, las pruebas también demuestran que a medida que disminuye la relación entre el esfuerzo máximo y el mínimo, se reduce de modo considerable la resistencia al a fatiga. Las pruebas indican además

que los aceros con resistencia a la tracción semejante tienen casi la misma resistencia a la fatiga.

Estas propiedades se determinan mediante la realización de diferentes pruebas o ensayos, para determinar qué material es el que emplearemos para el fin que le queramos dar. En la tabla 5.3 se dan algunas características mecánicas para diferentes grados y clases de aceros, según la Norma Boliviana.

TABLA 5.4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS MÍNIMAS GARANTIZADAS

Designación (1)	Clase de Acero	Limite elástico f_y [Mpa], no menor que	Carga unitaria de rotura, f_s [Mpa], no menor que ⁽²⁾	Alargamiento de rotura en %, sobre base de $5 \cdot \varnothing$, no menor que	Relación f_s/f_y en ensayo no menor que ⁽³⁾
AH 400 N	D. N.	400	520	16	1,29
AH 400 F	E. F.	400	440	12	1,1
AH 500 N	D. N.	500	600	14	1,2
AH 500 F	E. F.	500	550	10	1,1
AH 600 N	D. N.	600	700	12	1,16
AH 600 F	E. F.	600	660	8	1,1

(1). AH = Acero para Hormigón (DN = Dureza Natural; EF = Estirado en Frío)

(2). Para el calculo de valores unitario se utilizará la sección nominal.

(3). Relación mínima admisible entre los valores de la carga unitaria de rotura y del limite elástico, obtenidos en cada ensayo
Fuente: Referencia 1

5.7. ENSAYOS PARA EL ACERO

Las propiedades mencionadas anteriormente se miden mediante diferentes ensayos a los que se someten los aceros, dentro de los cuales desarrollaremos a continuación los necesarios en el diseño y puesta en obra.

5.7.1. ENSAYO DE TRACCIÓN (NB 736)

Debido a la gran cantidad de información que puede obtenerse a partir de este ensayo, es sin duda alguna, uno de los test mecánicos más empleados para el acero. La versatilidad del ensayo de tracción radica en el hecho de que permite medir al mismo tiempo, tanto la ductilidad, como la resistencia. El valor de resistencia es directamente utilizado en todo lo que se refiere al diseño. Los datos relativos a la ductilidad, proveen una buena medida de los límites hasta los cuales se puede llegar a deformar el acero sin llegar a la rotura.

Este ensayo consiste en someter una barra, de sección uniforme y conocida, a una fuerza de tracción que va aumentando progresivamente. En forma simultánea se van midiendo los correspondientes alargamientos de la barra.

La figura 5.12 muestra un esquema de una máquina para ensayos de tracción, en la que se estira la barra a una velocidad constante. Con los resultados de la elongación de la barra, se puede graficar una curva de carga contra alargamiento, que generalmente se registran como valores de esfuerzo y deformación unitarios, y son independientes de la geometría de la barra (figura 5.13)

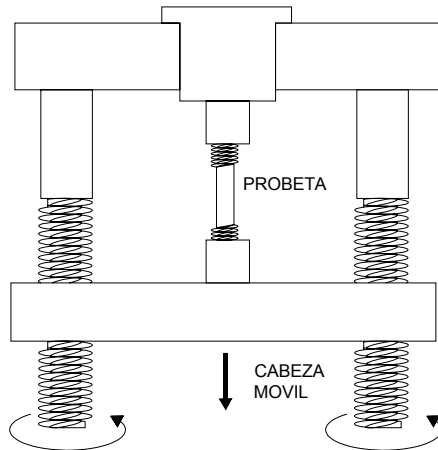


FIGURA 5.12 Esquema de una máquina para ensayos de tracción.

Fuente: Referencia 20

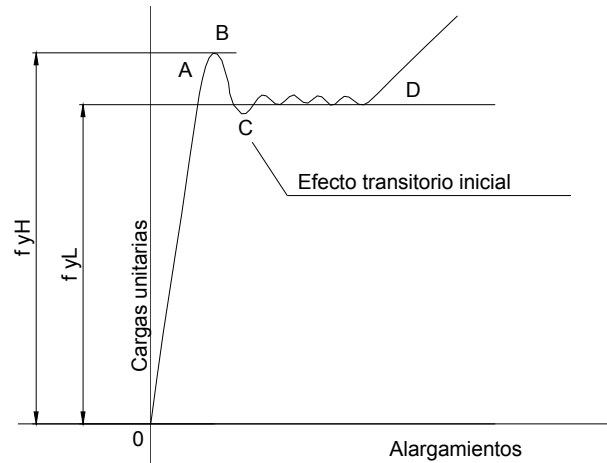


FIGURA 5.13 Carga vs Alargamiento

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 4



FIGURA 5.14 Máquina de tracción



Laboratorio de Resistencia de Materiales Universidad Tecnica de Oruro (UTO)
Fuente: Propia

Al iniciarse el ensayo, el material se deforma elásticamente; esto significa que si la carga se elimina, la muestra recupera su longitud inicial.

Cuando el esfuerzo alcanza su máximo valor de resistencia a la tensión, se forma en la barra una estricción o cuello (figura 5.15), la cual es una reducción localizada en el área de la sección transversal, en la que se concentra todo el alargamiento posterior.

Una vez formado este cuello, el esfuerzo disminuye al aumentar la deformación y continúa disminuyendo hasta que la barra se rompe.

Determinación del alargamiento.- Alargamiento es el porcentaje que el acero se alarga cuando es sometido a una carga que pase su Límite de Fluencia. La determinación del Alargamiento se hace por la comparación entre la distancia entre dos marcas hechas en la barra antes del ensayo, denominado largo inicial L_0 , y la distancia entre las dos marcas después que se rompe la barra, denominado largo final L_f (figura 5.15). El largo inicial utilizado es 10 veces el diámetro nominal.

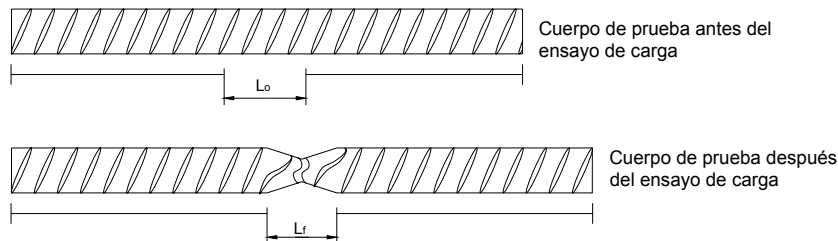


FIGURA 5.15 Determinación del alargamiento

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 21

5.7.2. ENSAYO DE DUREZA

El ensayo de dureza mide la resistencia de un material a la penetración de un punzón o una cuchilla. Este penetrador es también llamado durómetro. El durómetro usualmente consta de una esfera, pirámide o un cono de un material mucho más duro que el acero que se está midiendo. La profundidad hasta la cual penetra este material nos entrega un valor, el que está tabulado, obteniéndose así una medida de la dureza del acero. Dado que el ensayo de dureza puede hacerse fácilmente, la información obtenida puede ser evaluada inmediatamente.

Existen varios métodos para medir la dureza, a continuación nombraremos los dos más comunes, el método Brinell y El método Rockwell.



FIGURA 5.16 Aparato Brinell

Dureza Brinell (NB 297; ASTM E10).- En él, una esfera de 10 mm de diámetro, usualmente de un acero endurecido, se presiona contra la superficie del material bajo una carga estática de 3.000 kg. El tamaño de la huella nos entrega una medida de la dureza bajo las condiciones del ensayo.

Dureza Rockwell (NB 346; ASTM E18).-A diferencia del anterior, en el test de Rockwell se aplica primero una carga pequeña (de menos de 10 kg), lo que hace que el indentador penetre hasta una cierta profundidad. Luego se aplica la carga mayor predeterminada. La diferencia en la penetración nos entrega una medida de la dureza del acero.

Fuente: Referencia 20

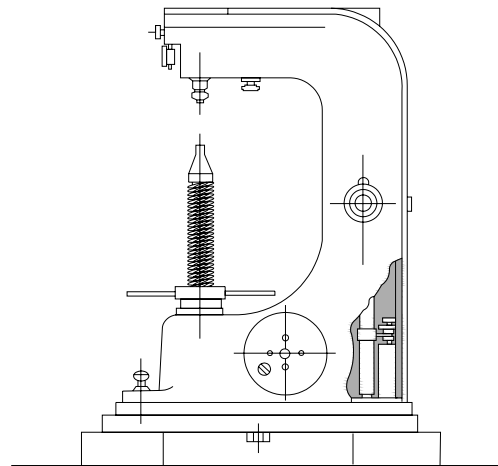


FIGURA 5.17 Aparato Rockwell

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 20

5.7.3. ENSAYO DE DOBLADO (NB 737)

Este ensayo mide la capacidad de la barra para doblarse hasta llegar a un doblez de radio mínimo sin agrietarse.

Este ensayo sirve para obtener una idea aproximada sobre el comportamiento del acero a la flexión o esfuerzo de doblado, necesaria para prevenir roturas frágiles durante las manipulaciones de doblado y transporte. Se comienza el ensayo, colocando la pieza sobre dos apoyos, cuya separación está normalizada. Se aplica luego una fuerza controlada y que aumenta paulatinamente hasta que la barra se dobla completamente o comienzan a aparecer las primeras grietas (figura 5.18).

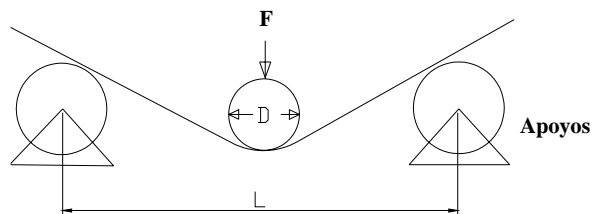


FIGURA 5.18 Esquema del ensayo de doblado

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 20

5.7.4. ENSAYO DE ADHERENCIA POR FLEXIÓN (NB 740)

La probeta para el ensayo de adherencia por flexión consiste en dos medias viguetas de hormigón armadas con una barra embebida en sus extremos y unidas por una rótula metálica en la zona de compresión (figura 5.19). La barra va provista de manguitos de plástico que dejan, en cada semiviga, una longitud adherente de $10 \cdot \phi$.

Con esta disposición se obtienen tres ventajas importantes: se anula el efecto local de apoyos; se conoce con precisión la tensión en la armadura, al conocer exactamente el brazo del par interno; y se obtienen dos resultados por ensayo.

En los extremos de las barras se colocan comparadores para medir deslizamientos. En el ensayo se determinan los valores $\tau_{0,01}$; $\tau_{0,1}$ y τ_1 de las tensiones en la barra que corresponden a deslizamientos de 0,01; 0,1 y 1 milímetros, respectivamente; así como el valor *max* de la tensión de rotura de adherencia, τ_{bu} , que corresponde a un deslizamiento de 3 mm, o a la rotura si esta se produce antes.

Se denomina *tensión media de adherencia* τ_{bm} a la media aritmética de los tres valores $\tau_{0,01}$; $\tau_{0,1}$ y τ_1 . Debe verificarse:

TABLA 5.5 CARACTERÍSTICAS DE ADHERENCIA, VALORES MÍNIMOS

Diámetro nominal, ϕ , (mm)	Tensión media de adherencia, τ_{bm} (Mpa)	Tensión de rotura, τ_{bu} (Mpa)
< 8	≥ 7	$\geq 11,5$
8 a 32	$8 - 0,12 \phi$	$13 - 0,2 \cdot \phi$
> 32	≥ 4	≥ 7

Fuente: Referencia 1

Si dichas relaciones se satisfacen simultáneamente, en cada rango de diámetros, la barra es calificada como de “alta adherencia” o de “adherencia mejorada”

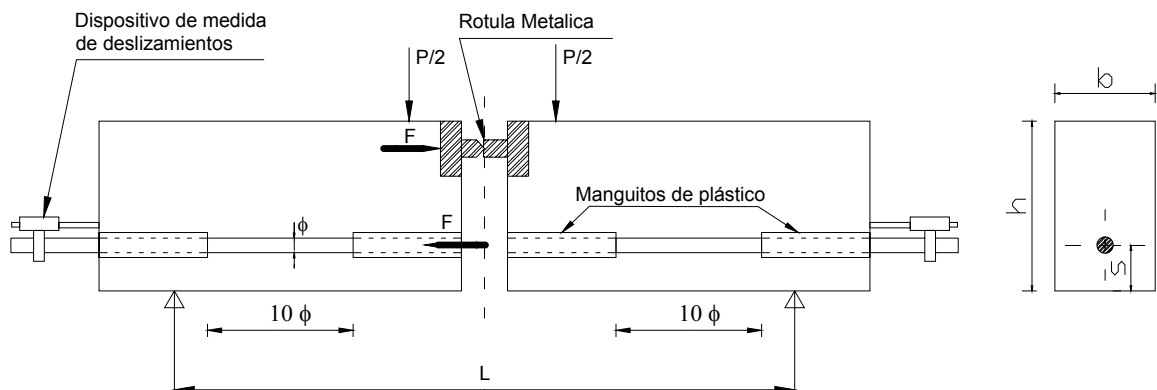


FIGURA 5.19 Esquema de la probeta para el ensayo de Adherencia por Flexión

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 17

5.8. CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS

En un plano constructivo, lista de materiales, factura, etiqueta de barra, etc., el diámetro de barra viene precedido por el símbolo convencional de diámetro (\varnothing). Cuando se indica más de una barra del mismo diámetro, el número de barras va antes de el símbolo de diámetro; de este modo, "6 \varnothing 10" indica: 6 barras, de 10 mm de diámetro cada una.

5.8.1. DOBLADO

Es de mucha importancia el diámetro requerido del eje de doblado al cual debe doblarse la muestra sin que se agriete. El radio mínimo de dobladura difiere según la resistencia y diámetro de la barra.

El doblado se realiza en frío a velocidad moderada. Sé admitirá el doblado en caliente en los aceros ordinarios de diámetro igual o superior a 25 mm cuidando que no se alcance temperaturas superiores a 800°C, después del doblado se dejan enfriar lentamente. En lo posible este tipo de doblado debe evitarse.

En la figura 5.20, se muestra la forma en que se realiza el doblado, y en la tabla 5.5 se dan los diámetros de los ejes de doblado para los diferentes grados y diámetros de barras, según la Norma Boliviana, y en la tabla 5.6 según la norma ACI.

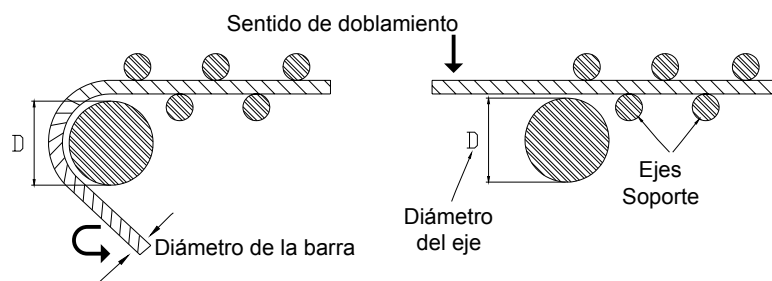


FIGURA 5.20 Doblado del acero en obra

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 21

TABLA 5.6 DIÁMETRO DE LOS EJES DE DOBLADO SEGÚN LA NORMA BOLIVIANA

Designación	Doblado Simple			Doblado - Desdoblado		
	D para $\alpha = 180^\circ$			D para $\alpha = 90^\circ \beta = 20^\circ$		
	$\varnothing < 12$	$12 < \varnothing < 25$	$\varnothing > 25$	$\varnothing < 12$	$12 < \varnothing < 25$	$\varnothing > 25$
AH 400 N	3 \varnothing	3,5 \varnothing	4 \varnothing	6 \varnothing	7 \varnothing	8 \varnothing
AH 400 F	3 \varnothing	3,5 \varnothing	4 \varnothing	6 \varnothing	7 \varnothing	8 \varnothing
AH 500 N	4 \varnothing	4,5 \varnothing	5 \varnothing	8 \varnothing	9 \varnothing	10 \varnothing
AH 500 F	4 \varnothing	4,5 \varnothing	5 \varnothing	8 \varnothing	9 \varnothing	10 \varnothing
AH 600 N	5 \varnothing	5,5 \varnothing	6 \varnothing	10 \varnothing	11 \varnothing	12 \varnothing
AH 600 F	5 \varnothing	5,5 \varnothing	6 \varnothing	10 \varnothing	11 \varnothing	12 \varnothing

\varnothing = Diámetro nominal de la barra en mm ; α = ángulo de doblado ; β = ángulo de desdoblado

Fuente: Referencia 1

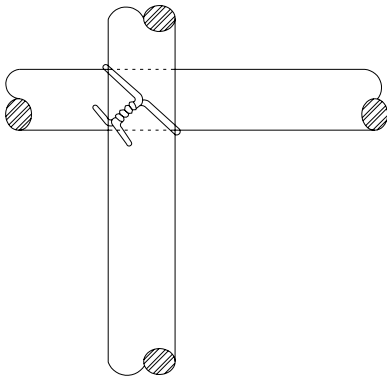
TABLA 5.7 DIÁMETRO MÍNIMO DE LOS EJES DE DOBLADO SEGÚN EL ACI

Acero a doblar	Diámetro mínimo del eje de doblado
$\leq 10 \text{ mm}$	3 \varnothing
10 a 25 mm	5 \varnothing
$\geq 25 \text{ mm}$	8 \varnothing

\varnothing = diámetro nominal

Fuente: Referencia 14

La colocación exacta del acero de refuerzo es de suma importancia. El acero de refuerzo debe sostenerse con firmeza en su posición adecuada (atándose y apoyándose correctamente), como se indique en los planos constructivos, antes de vaciar el hormigón.



La manera más común para mantener unidas las barras es con alambre de amarre. Se atan un número suficiente de intersecciones del refuerzo, para evitar que éste se desplace. No es necesario atar todas las intersecciones. Las ataduras no agregan resistencia a la estructura acabada, su única función es mantener las barras en su posición adecuada hasta que se haya vaciado el hormigón. Aun cuando se atan los empalmes montados, el hormigón que los rodea forma el empalme real. En la figura 5.21 se muestra una atadura típica.

FIGURA 5.21 Atadura típica

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 16

En la tabla 5.7 se indican los valores de cuantías geométricas mínimas de armaduras, que deben disponerse en los diferentes tipos de elementos estructurales, en función del tipo de acero utilizado.

TABLA 5.8 CUANTÍAS GEOMÉTRICAS, MÍNIMAS, REFERIDAS A LA SECCIÓN TOTAL DE HORMIGÓN. (EN TANTO POR MIL)

Elemento	Posición	AH 400	AH 500	AH 600
Pilares*		6	5	4
Losa**		1.8	1.5	1.4
Viga***		3.3	2.8	2.3
Muros****	Horizontal	2	1.6	1.4
	Vertical	4	3.2	2.8

* Cuantía mínima de armadura longitudinal

** Cuantía mínima de cada una de las armaduras, longitudinal y transversal. Las losas apoyadas sobre el terreno, requieren estudio especial.

*** Cuantía mínima correspondiente a la cara de tracción. Se recomienda disponer, en la cara opuesta, una armadura mínima, igual al 30% de la consignada.

**** Cuantía mínima de la armadura total, en la dirección considerada. Esta armadura total debe distribuirse entre las dos caras, de forma que ninguna de ellas tenga una cuantía inferior a 1/3 de la indicada. Los muros que deban cumplir requisitos de estanquidad, requieren estudio especial.

Fuente: Referencia 10

5.8.2. EMPALMES

En cualquier estructura de cierto tamaño, los empalmes del refuerzo son inevitables. Los empalmes diseñados adecuadamente son un elemento clave en cualquier diseño bien ejecutado. Los dibujos de diseño o las especificaciones del proyecto deben mostrar o describir con claridad todas las ubicaciones de los empalmes.

Se aplican tres métodos para empalmar las barras de refuerzo: empalmes montados, conexiones mecánicas y empalmes soldados, estos se desarrollarán el apartado 15.1.2.1.

Mayores detalles, tanto constructivos como de diseño, se encuentran en la norma ACI 318 capítulo 12, “Longitudes de desarrollo y empalmes para el refuerzo”

5.9. MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE BARRAS DE REFUERZO

- Para eliminar los riesgos de oxidación o corrosión, las barras no deben almacenarse directamente sobre el piso. El almacenamiento se realizará en locales ventilados y al abrigo de la humedad del suelo y paredes, adoptándose las precauciones precisas para evitar que el material pueda ensuciarse o producirse cualquier deterioro debido a ataque químico, operaciones de soldadura realizadas en las proximidades, etc.
- Antes de almacenar las armaduras se comprobará que están limpias, sin manchas de grasa, aceite, pintura, polvo, tierra o cualquier otra materia perjudicial para su buena conservación y posterior adherencia.
- Las armaduras deben almacenarse cuidadosamente clasificadas según sus tipos, clases y los lotes de que procedan.
- El estado de superficie de todos los aceros será siempre objeto de examen antes de su uso, especialmente después de un prolongado almacenamiento en obra o taller, con el fin de asegurarse de que no presentan alteraciones perjudiciales.
- Las barras de refuerzo deben manejarse y almacenarse de modo que no se doblen o deformen.

En la mayor parte de los casos, el almacenamiento al descubierto dará por resultado la oxidación de la barra.

En los últimos años, la conveniencia de la oxidación del refuerzo ha despertado cierto interés. Varios estudios de diferentes entidades han demostrado que una delgada película de óxido, en lugar de perjudicar la adherencia entre el acero y el hormigón, en realidad causan una mejora en las características de adherencia y no tiene efectos perjudiciales sobre esta. El Laboratorio de Hormigón del U.S. Bureau of Reclamation condujo una extensa serie de pruebas que llevaron a la conclusión de

que el manejo normal de las barras, era preparación suficiente incluso para el acero de refuerzo con gran cantidad de oxido y que la limpieza con chorro de arena, la limpieza con cepillo de alambre no dieron lugar a una mejor adherencia. Pero debe tenerse en cuenta que en los casos en que las barras de refuerzo tengan demasiado oxido, es posible que se haya reducido el área de la sección transversal lo suficiente como para que no sea adecuado usar esas barras. Esto se puede verificar al limpiar y pesar un trozo de barra para asegurarse de que satisfará a su valor de *Diámetro Equivalente*, (Ecuación E 5.1).

BIBLIOGRAFÍA

1. NB 732:1996 Productos Laminados - Barras Corrugadas para Hormigón Armado – Características.
2. NB 266:1978 Aceros al Carbono y de Corte Libre - Clasificación por Composición Química.
3. NB 728:1996 Productos Laminados - Barras para Hormigón Armado - Definiciones y Clasificación.
4. NB 736:1996 Productos Laminados - Barras Lisas y Corrugadas para Hormigón Armado - Ensayo de Tracción a Temperatura de Referencia.
5. NB 297:1979 Método de Ensayo de Dureza Brinell para Aceros y Fierro Fundido.
6. NB 346:1979 Ensayo de Dureza Rockwell (escalas B y C) para Acero.
7. NB 737:1996 Productos Laminados - Barras para Hormigón Armado - Ensayo de Doblado Simple.
8. NB 740:1996 Productos Laminados - Barras para Hormigón Armado - Ensayo de Adherencia por Flexión.
9. NB 733:1996 Productos laminados - mallas electrosoldadas de acero para hormigón armado - requisitos generales.
10. CBH 87 Norma Boliviana del Hormigón Armado.
11. ASTM A820M-04 Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete.
12. ACI 544.1R-96 State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete.
13. ACI 318M-02/318RM-02(metric) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
14. ACI 301 M Specifications for Structural Concrete.
15. Notes on ACI 318-95 Building Code Requirements for Structural Concrete with Design Applications..
16. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) "Manual de la Construcción con Concreto". 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
17. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". 14ª ed., Gustavo Pili, SA, Barcelona.
18. MERRITT F. S, LOFTIN M. K, RICKETTS J. T. (1999), "Manual del Ingeniero Civil", 3ª ed. en español, Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
19. NILSON A.H. (1999) "Diseño de Estructuras de Concreto", 12ª ed, McGraw_Hill, Colombia.
20. GERDAU AZA "Compendio de Normas para Productos de Acero", 3ª ed., <http://www.gerdauaza.cl/frameset.htm>.
21. <http://www.belgo.com.br>.
22. <http://www.acindar.com.ar>.
23. NB 734:1996 Productos laminados - mallas electrosoldadas de acero para hormigón armado - características
24. NB 730:1996 Productos laminados - barras lisas para hormigón armado – características
25. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

II

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

CAPITULO 6

TRABAJABILIDAD

6.1. INTRODUCCIÓN

La trabajabilidad de una mezcla de hormigón se puede definir como la facilidad con la que esta puede mezclarse, manejarse, transportarse y vaciarse en su posición final con una pérdida mínima de homogeneidad. Esta, depende de las proporciones y características físicas de los ingredientes como se explica mas adelante, de las condiciones de puesta en obra, de la geometría del elemento y del espaciamiento y tamaño del refuerzo.

Una mezcla puede considerarse trabajable en algunas condiciones y no serlo en otras, por ejemplo, el hormigón que tiene trabajabilidad satisfactoria para la losa de un pavimento sería difícil de vaciar en una columna fuertemente reforzada, por tratarse de un hormigón seco y de un tamaño máximo de agregado que no se deslizaría con facilidad a través del refuerzo de la columna lo que ocasionaría la formación de cangrejas.

6.1.1. MEDICIÓN DE LA TRABAJABILIDAD

La consistencia o fluidez del hormigón, es un componente importante de la trabajabilidad. Esta se mide por medio de las siguientes pruebas: El cono de Abrams para hormigones de consistencia fluida a seca (apartado 12.2.2.1), y El consistometro de Vebe para hormigones de consistencia seca a extremadamente seca (apartado 12.2.2.2).

Ya que todas las propiedades, necesarias para determinar la trabajabilidad de la mezcla de un hormigón, no se conocen o son imposibles de medir, debe aplicarse una inspección visual sistemática junto con los resultados de las pruebas de consistencia, y de exudación, para garantizar el uso del hormigón con la trabajabilidad satisfactoria. Es necesaria la vigilancia constante por parte del inspector para evitar efectos indeseables que provengan del uso de un hormigón con la trabajabilidad inadecuada.

6.2. EFECTO DE LOS COMPONENTES EN LA TRABAJABILIDAD

6.2.1. CEMENTO

La trabajabilidad de la mezcla de hormigón depende de la cantidad de cemento, de la finura de éste y de su composición química. Las mezclas muy pobres en cemento resultan propensas a ser ásperas y tener mala trabajabilidad. En general, si lo demás se mantiene igual, la trabajabilidad aumenta conforme aumenta la finura del cemento. Sin embargo, las mezclas ricas en cemento pueden ser demasiado cohesivas o pegajosas.

6.2.2. AGREGADOS

La gradación y forma de los agregados finos y gruesos y el tamaño máximo del agregado grueso tienen efectos importantes sobre la trabajabilidad.

Tanto los agregados finos como los gruesos deben graduarse uniformemente, desde fino hasta grueso, y no deben tener una cantidad excesiva de cualquier fracción de un tamaño, lo que tendería a causar la interferencia de las partículas y daría por resultado una mala trabajabilidad. *“Las gradaciones con discontinuidades, en las que se han eliminado una o más de las fracciones intermedias de tamaños deben verificarse en las condiciones de la obra, antes de su adopción”.*

Las arenas naturales con granos redondeados producen hormigones más trabajables que las arenas trituradas formadas por trozos angulares, planos o alargados. Estos últimos tipos suelen tener un elevado porcentaje de vacíos y pueden causar una exudación excesiva del hormigón. Los agregados triturados con forma cúbica, si se gradúan y combinan adecuadamente con la cantidad apropiada de mortero trabajable, producirán un hormigón trabajable. Los trozos planos con forma de disco y las partículas largas delgadas y semejantes a cuñas son objetables porque no pueden compactarse con facilidad y apretadamente.

Debe seleccionarse el tamaño máximo de agregado grueso según lo descrito en el apartado 2.5.5.3.

6.2.3. ADITIVOS

Las mezclas trabajables de hormigón hechas con agregados satisfactorios, cemento suficiente y la cantidad correcta de agua para producir el revenimiento requerido normalmente no necesitan que se les agreguen aditivos para tener la trabajabilidad satisfactoria. Sin embargo, los aditivos son útiles en las mezclas pobres y ásperas, de mala trabajabilidad y en donde se tienen condiciones difíciles de vaciado, los aditivos utilizados para mejorar la trabajabilidad son: los Fluidificantes o plastificantes y los inclusores de aire. Cada uno de estos está ampliamente descrito en el capítulo 4.

Y los aditivos, *inclusores de aire*, al mismo tiempo que, sin ser su propósito, mejora la trabajabilidad de las mezclas de hormigón, pueden causar problemas relacionados con el acabado de superficies horizontales. Debido a la marcada reducción en la exudación del hormigón con aire incluido, este suele requerir que el acabado se realice con mucha mayor rapidez que para el hormigón que no contiene ese aditivo.

Además para aumentar la trabajabilidad de un hormigón pobre es necesario aumentar el área superficial de los sólidos por unidad de volumen de agua. Esto se puede llevar a cabo al agregar aditivos

finamente divididos, como cal hidratada o arena muy fina, o bien, si se aumenta el contenido de cemento. La cantidad del aditivo finamente dividido que se agregue a la mezcla de hormigón se debe controlar con cuidado, ya que las cantidades grandes tienden a requerir una relación más elevada agua/cemento, con efectos indeseables sobre la resistencia, durabilidad y contracción por secado, a menos que se hagan los ajustes adecuados.

6.3. SEGREGACIÓN

Consiste en la separación de los materiales de la mezcla de hormigón, *se presenta en dos formas:*

1. Separación entre *agregados gruesos y finos*.-Ya sean porque se amontonan o porque se van al fondo de los elementos por la acción de la gravedad, esto produce lo que se llama cangrejas, generalmente se presentan porque las mezclas están muy secas.
2. Por la separación entre la *pasta* y los *agregados*.- En este caso se presenta por el exceso de humedad.

Se puede dar segregación por dos causas:

- **Internas:** diferencias del tamaño de partículas, mala distribución granulométrica, diferencias de densidades de los componentes y mala proporción de la mezcla.
- **Externas:** mal manejo, mala colocación, mal mezclado, poco mezclado, transporte demasiado largo y con vibraciones, y sobrevibración al momento de vaciar.

La forma más común de corregir la segregación es usando ventanas en los elementos estructurales al vaciar.

6.3.1. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA SEGREGACIÓN

La segregación de los diversos componentes del hormigón es perjudicial y deben realizarse todos los esfuerzos posibles para minimizarla. Las imperfecciones en el hormigón endurecido, como cangrejas, vetas de arena, capas débiles y porosas, cuarteadura, picadura y costras superficiales suelen estar relacionadas con la segregación.

La reparación de los defectos dañinos debidos a la segregación es difícil y costosa. Es mucho mejor evitar la segregación mediante la utilización de mezclas bien diseñadas y vaciando el hormigón en forma adecuada bajo una supervisión competente.

La segregación del hormigón siempre es un problema, porque el hormigón no es un material

homogéneo sino una mezcla de materiales que varían mucho respecto al tamaño y la gravedad específica. Debe tenerse un cuidado especial en evitar los defectos debidos a la segregación cuando la mezcla de hormigón es muy pobre, está muy húmeda, contiene agregado muy áspero que no es de forma cúbica o esférica, o el tamaño máximo del agregado es grande en comparación con las dimensiones del elemento que se va a vaciar.

En una mezcla de hormigón, la segregación no se limita a los sólidos. El agua de mezclado tiende a subir, a medida que las partículas sólidas más pesadas del agregado y del cemento se asientan a través de ella (exudación). Es posible que este tipo de segregación se aprecie durante el vaciado, pero es más evidente después de haberlo realizado.

La dosificación adecuada es el único de los factores importantes que influye sobre la segregación. Después de mezclar, todas las operaciones relacionadas con el transporte y vaciado del hormigón, brindan oportunidades adicionales para la pérdida de uniformidad. El llenado de las tolvas o carretillas con el hormigón y su respectiva descarga en el encofrado por métodos manuales o la vibración, dan lugar a más oportunidades para la segregación.

Todas las operaciones relacionadas con el manejo, vaciado y consolidación de la mezcla de hormigón deben planearse y controlarse con todo cuidado para evitar la segregación. En general, la mezcla de hormigón no debe estar más húmeda de lo necesario, debe dejarse que caiga verticalmente en un flujo continuo y debe vaciarse tan cerca como se pueda de su ubicación final para evitar el exceso de movimiento lateral. En la sección “Puesta en Obra” se analizan con detalle los métodos correctos e incorrectos de manejo, vaciado y compactación del hormigón.

6.3.2. EXUDACIÓN (SANGRADO)

Se puede obtener otra medida de la trabajabilidad con base en la prueba de exudación, en la que se determina la tendencia del agua a separarse de los otros componentes del hormigón y subir hasta la parte superior de la masa de ese hormigón.

La tendencia del agua de subir a la superficie del hormigón recién vaciado, conocida como exudación, se puede determinar con base en los Métodos estándar de la ASTM C232 para la exudación del hormigón. La prueba consiste en vaciar hormigón en un recipiente de 14 lt de capacidad, con la aplicación de procedimientos estándar. Luego la superficie se alisa y nivela con la llana, con un mínimo de acción y el hormigón se deja reposar. A intervalos específicos, el agua que se acumula sobre la superficie se extrae con una pipeta y se mide. Puede obtenerse la razón de exudación y el agua acumulada de exudación, expresadas como porcentajes del agua neta de mezclado en la muestra de prueba.

Consideraciones

La exudación podría considerarse como conveniente debido a que al disminuir el contenido de agua conduce a una disminución en la relación agua/cemento. Sin embargo, la exudación perturba la homogeneidad del hormigón y provoca otros resultados que no son convenientes, por lo cual se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- En virtud de la ganancia de agua en la superficie del hormigón recién vaciado, esta superficie tiende a volverse débil y porosa, quedando sujeta a la desintegración por la acción de congelación y deshielo o por la percolación del agua.
- El agua que sube a la superficie puede arrastrar las partículas inertes y finas del cemento que debilitan la parte superior y forman una nata llamada “lechosidad”, la cual debe quitarse si se va a vaciar una nueva capa de hormigón.
- Conforme el agua sube por el hormigón se forman canales de flujo en la masa de éste y se acumula agua debajo de las partículas de agregado grueso y debajo de las varillas horizontales de refuerzo. Esta acción conduce a una estructura más débil de hormigón debido a la falta de adherencia entre la pasta y el agregado grueso y entre el hormigón y el acero de refuerzo. Como resultado, un hormigón con una cantidad grande de agua de exudación puede ser muy permeable y el acero de refuerzo puede quedar sujeto a la corrosión.

La exudación puede controlarse en gran parte mediante una selección adecuada de los componentes y de las proporciones de la mezcla de hormigón. Las mezclas más ricas hechas con cementos finamente molidos que tengan propiedades normales de exudación, cantidades mínimas de agua de mezclado, arenas naturales suaves con un porcentaje adecuado de finos, aditivos inclusores de aire o aditivos que consten de partículas finas son todas útiles en la disminución de la exudación de las mezclas de hormigón.

Puede obtenerse cierta mejora de las propiedades del hormigón que ha tenido una exudación apreciable vibrándolo o apisonándolo al final de la exudación y principio del fraguado.

BIBLIOGRAFÍA

1. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) “Manual de la Construcción con Concreto”. 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
2. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association “Design and Control of Concrete Mixtures”. 14ª ed., www.portcement.org

CAPITULO 7

RESISTENCIA

7.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Las resistencias del hormigón, tanto a compresión, tracción y corte, y sus propiedades, como son el modulo de elasticidad y la relación de Poisson, son utilizadas por el proyectista para el diseño de las estructuras. Estas reciben la influencia de los tipos y cantidades de los materiales que conforman el hormigón, y la forma de puesta en obra. En virtud de esto, deben emplearse métodos de verificación de la calidad del hormigón.

El procedimiento usual es fabricar probetas, al mismo tiempo que se vacía la estructura, y considerar la resistencia de esa muestra como una medida de la resistencia del hormigón en la estructura. Los resultados que se obtengan a partir de los diferentes ensayos deben ser utilizados solo como una referencia ya que es posible que estos no reflejen las resistencias que alcanzara el hormigón en obra, debido a que las condiciones de puesta en obra, diferentes a las que se someten las probetas para los ensayos, afectan las propiedades del hormigón en obra. El objeto de este control es comprobar que la resistencia del hormigón que se vacía en obra es por lo menos igual a la especificada por el proyectista y que ha servido de base para los cálculos.

7.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Ver apartado 12.3.1.2)

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica más importante de un hormigón. Su determinación se efectúa mediante el ensayo de probetas, según métodos estandarizados, que se describirá en el capítulo 12.

En la tabla 7.1 se presentan las definiciones de resistencia a la compresión utilizadas para el diseño estructural, según la NB, el EHE y la ACI.

TABLA 7.1 CRITERIOS EN BASE A LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SEGÚN LA NB, LA EHE Y LA ACI.

Criterio	NB	EHE	ACI
Valor adoptado en el proyecto para la resistencia a compresión, como base de los cálculos, a este valor se aplican los coeficientes de seguridad prescritos por la norma*.	Resistencia característica de proyecto ó Resistencia especificada, f_{ck}	Resistencia característica de proyecto, f_{ck}	Resistencia Especificada, f'_c

* El 95% de los ensayos a compresión deben dar un valor de resistencia mayor a este. Los coeficientes de seguridad (γ_c) se presentan en el artículo 15.3 de la norma EHE; Los factores de reducción de resistencia (ϕ) se presentan en la sección 9.3 de la ACI 318

Fuente: Elaboración Propia

7.3. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (Ver apartado 12.3.1.2)

Normalmente no se requiere que el hormigón resista fuerzas directas de tracción, sin embargo, esta resistencia es importante con respecto al agrietamiento, debido a la limitación de las contracciones. La formación y propagación de las grietas, en el lado de tracción de elementos de hormigón armado sometidos a flexión, dependen principalmente de la resistencia a la tracción. También ocurren esfuerzos de tracción en el hormigón como resultado de cortante, torsión y otras acciones, y en la mayoría de los casos el comportamiento del elemento cambia después de ocurrido el agrietamiento.

Existen 3 formas de obtener la resistencia a la tracción¹: por flexión (modulo de rotura), por hendimiento (tracción indirecta) y por tracción axial (tracción directa); esta última no se realiza con frecuencia por las dificultades que se presentan en la aplicación de fuerzas de tracción directa.

Los resultados de todos los tipos de ensayos para determinar la resistencia a la tracción muestran una dispersión considerablemente mayor que la de los ensayos a compresión.

Las ecuaciones para determinar las resistencias a la compresión, flexo tracción y tracción indirecta, se presentan en el capítulo 12, apartado 12.3.1.2

7.4. RESISTENCIA AL CORTE

La importancia de la resistencia al corte es evidente a partir del hecho de que los cilindros estándar de hormigón probados en la compresión axial suelen fallar por corte a lo largo de un plano inclinado. En realidad, la falla se debe a una combinación de esfuerzos normales y de corte sobre el plano. La falla en diagonal en el alma de una viga de hormigón es a causa de un esfuerzo de tracción que resulta de una combinación de esfuerzos de tracción y de corte. No se ha determinado en forma directa la resistencia del hormigón al esfuerzo puro de corte porque una condición de esfuerzos de ese tipo causa esfuerzos principales de tracción y compresión, de magnitud igual a los esfuerzos de corte, los que actúan sobre otros planos. Como el hormigón es más débil a la tracción que al corte, la falla se presenta como resultado de los esfuerzos de tracción. Las resistencias al corte que se han dado a conocer varían mucho debido a las dificultades y diferencias en los procedimientos de prueba.

¹ Los ensayos para determinar la resistencia a la tracción por flexión y por hendimiento se describen en el capítulo 12.

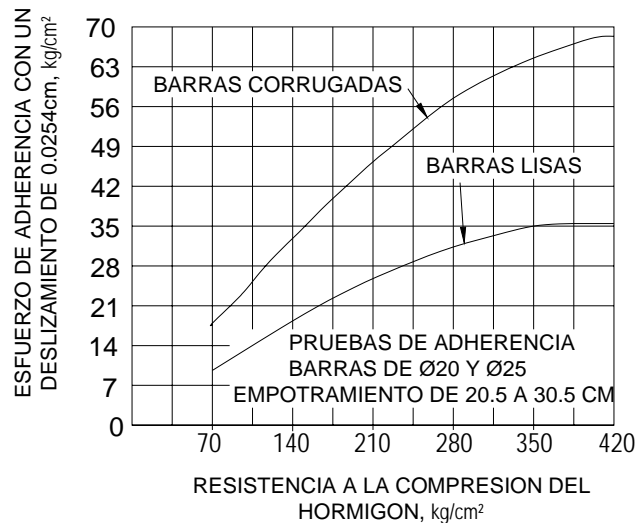


FIGURA 7.1 Variación de la adherencia con la resistencia a la compresión del hormigón.

Fuente Referencia 3

7.5. ADHERENCIA

Para un buen comportamiento de las estructuras de hormigón armado es necesaria la adherencia satisfactoria entre el acero de refuerzo y el hormigón. La adherencia puede ser resultado de adhesión, fricción, acción de tope o anclaje en los extremos.

En las curvas de la figura 7.1 se muestran las diferencias en adherencia entre las varillas lisas y corrugadas.

7.6. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA RESISTENCIA

7.6.1. MATERIALES

La variación en la proporción de los componentes de la mezcla afecta a la resistencia del hormigón. A continuación se mostraran los cambios en la resistencia que puede ocasionar la variación de algunos de los componentes de la mezcla de hormigón:

7.6.1.1. RELACIÓN AGUA/CEMENTO (A/C)

La relación A/C de la mezcla influirá mucho sobre la resistencia del hormigón endurecido con un envejecimiento dado.

En la figura 7.2 se dan las relaciones entre la resistencia a la compresión y flexión versus la relación A/C. En cada caso, se muestra una banda de valores, en lugar de una sola curva, para cubrir variaciones en los materiales y procedimientos de prueba.

La posición exacta de la curva de resistencia contra la relación A/C dependerá de las propiedades y proporciones de cada uno de los ingredientes, los métodos de mezclado, vaciado y curado.

Una mezcla dada puede tener una resistencia relativamente buena o mala, dependiendo de la cantidad de agua que se agregue. Una mayor relación A/C dará una menor resistencia, esto quiere decir que a mayor cantidad de agua, menos resistencia.

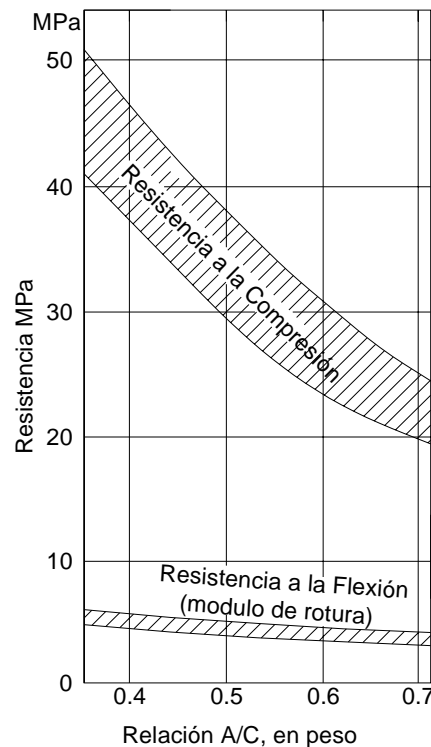


FIGURA 7.2 Efecto de la relación A/C en la resistencia a la compresión y a la flexión a los 28 días.

Fuente referencia 5

7.6.1.2. CONTENIDO DE CEMENTO

La resistencia del hormigón aumenta con la proporción de cemento en la mezcla, hasta que se alcanza la resistencia del cemento o el agregado, según el que sea más débil.

Los datos de la figura 7.3 representan pruebas sobre hormigones trabajables, curados en húmedo, que tienen el mismo revenimiento.

En la figura 7.4 se muestra el efecto de la finura del cemento, expresada como superficie específica en centímetros cuadrados por gramo de cemento, sobre la resistencia a la compresión del hormigón, con cuatro envejecimientos diferentes. Los cementos finamente molidos resultan convenientes en cuanto a que aumentan la resistencia, en especial en los primeros días de envejecimiento, y también aumentan la trabajabilidad. Pueden no ser convenientes debido a que contribuyen al agrietamiento y tienen una resistencia menor a la congelación y el deshielo.

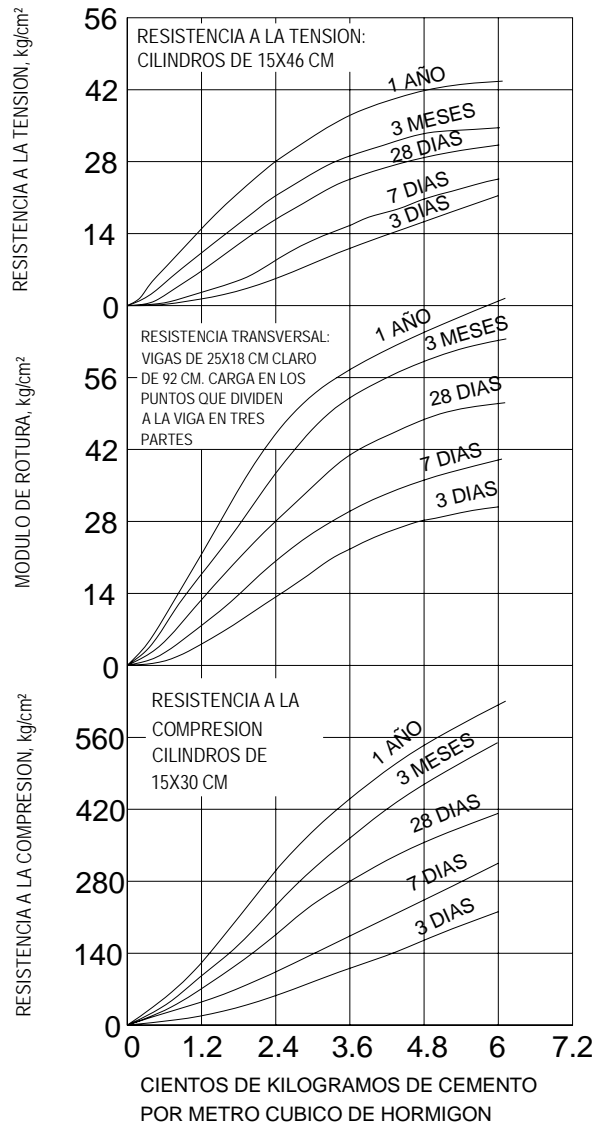


FIGURA 7.3 Efecto del contenido de cemento sobre la resistencia del hormigón.

Fuente Referencia 3

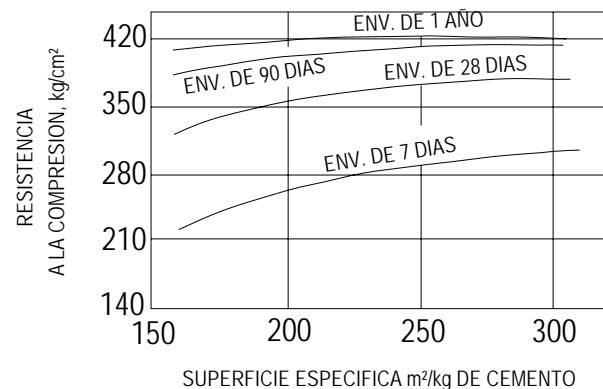


FIGURA 7.4 Relación de la Superficie Específica del cemento con la resistencia a la compresión del hormigón.

Fuente Referencia 3

7.6.1.3. AGREGADOS

Las características de los agregados que influyen sobre la resistencia del hormigón son el tipo, la forma, textura, tamaño máximo, solidez, gradación y limpieza de la partícula.

- *Tipo de agregado*

Por lo general, el efecto sobre la resistencia del hormigón del tipo de agregado con peso normal, propiedades y gradación satisfactorias, es pequeño, debido a que los agregados son más fuertes que la pasta de cemento.

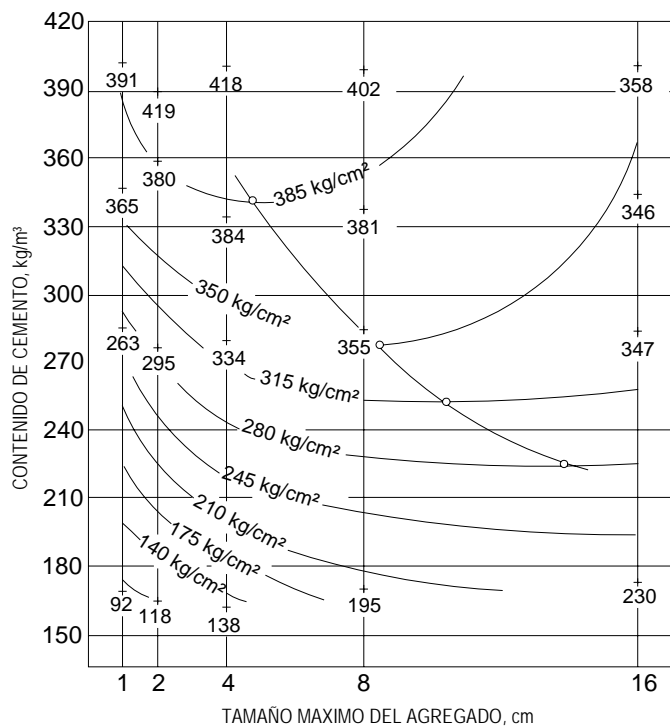


FIGURA 7.5 Variación del contenido de cemento con el tamaño máximo del agregado para diversas resistencias a la compresión.

Cada punto representa un promedio de 4 cilindros de hormigón, probados a 90 días. Las mezclas tuvieron un revenimiento constante de 5 ± 2.5 cm, para cada agregado de tamaño máximo.

Fuente Referencia 3

• *Tamaño máximo*

Conforme se aumenta el tamaño máximo del agregado en una mezcla de hormigón de un revenimiento dado, se disminuyen los contenidos de agua y de cemento, en kg/m^3 de hormigón. En la figura 7.5 se muestra la influencia del tamaño máximo del agregado sobre la resistencia a la compresión.

7.6.1.4. ADITIVOS

- Los aditivos reductores de agua y retardadores de fraguado mejoran la resistencia a la compresión.
- Los aditivos inclusores de aire pueden dar como resultado alguna pérdida de resistencia. Cuando la relación A/C se mantiene constante, la resistencia a la compresión se reduce alrededor del 5% para cada unidad de porcentaje de aire incluido. Sin embargo, cuando se

conserva constante el contenido de cemento y se saca ventaja de la oportunidad de reducir la relación A/C para una trabajabilidad dada, las pérdidas de resistencia son menores y es posible que en realidad tenga un ligero aumento para las mezclas más pobres.

En la figura 7.6 se muestra el efecto del contenido de aire sobre la resistencia a la compresión.

- Los aditivos puzolánicos y cementosos aumentan poco la resistencia, y en menor medida en bajas temperaturas.
- Cuando se usa ceniza muy fina la resistencia a la compresión suele reducirse a los 7 y 28 días y es posible que se incremente después de 3 meses. Sin embargo, mediante un diseño adecuado de la mezcla se puede hacer que las resistencias igualen a las del hormigón sin esa ceniza.

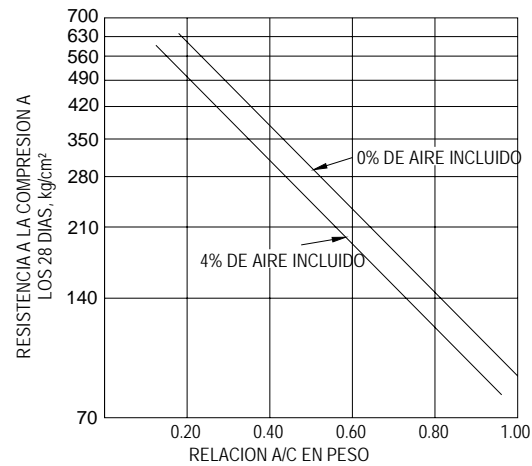
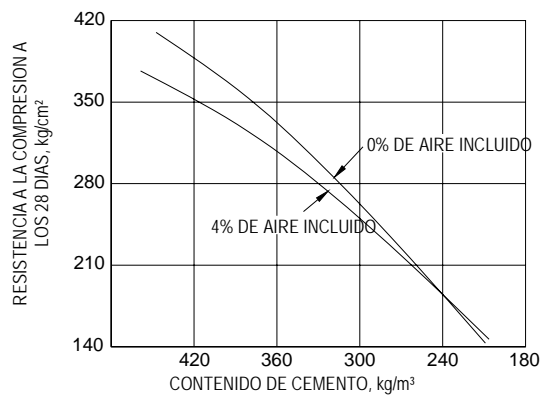


FIGURA 7.6 Efecto del contenido de aire sobre la resistencia a la compresión del hormigón.

Fuente Referencia 3

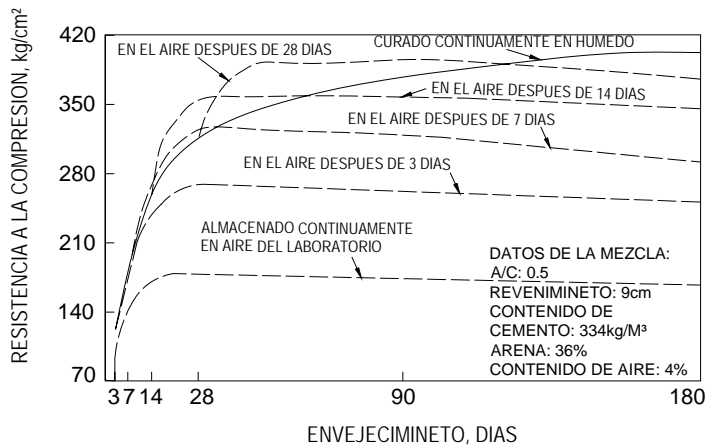


FIGURA 7.7 Efecto del secado al aire sobre la resistencia a la compresión del hormigón curado en húmedo.

Fuente Referencia 3

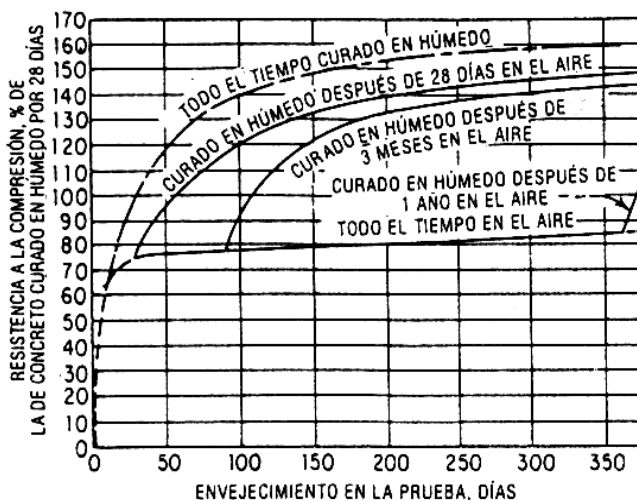


FIGURA 7.8 Efecto del curado sobre la resistencia a la compresión del hormigón.

Fuente Referencia 3

7.6.2. MÉTODO DE CURADO

En las figuras 7.7 y 7.8 se muestra el efecto de la humedad durante el curado. En ambas figuras se hace ver que la resistencia a la compresión aumenta, con una razón decreciente, conforme aumenta el periodo de curado en húmedo y que el desarrollo de la resistencia se detiene en unos cuantos días, si el hormigón se mantiene en el aire.

En la figura 7.7 se muestra que, cuando se discontinúa el curado en húmedo, la resistencia a la compresión aumenta durante un periodo corto pero, de allí en adelante, permanece constante o disminuye.

En la figura 7.8 se ilustra que, cuando se reanuda el curado en húmedo después de un periodo en el aire, también se reanudan los aumentos en la resistencia.

La información adicional acerca del efecto de la temperatura sobre la resistencia a la compresión que se da en la figura 7.9 hace ver los efectos convenientes de mantener un buen periodo de curado inicial durante el mayor tiempo que sea posible.

7.6.3. TEMPERATURA DE CURADO

En la figura 7.10 se muestra que se obtienen las resistencias más altas durante los primeros días con las temperaturas más elevadas de curado y que las resistencias a los 28 días, para temperaturas mayores de 13°C, van disminuyendo.

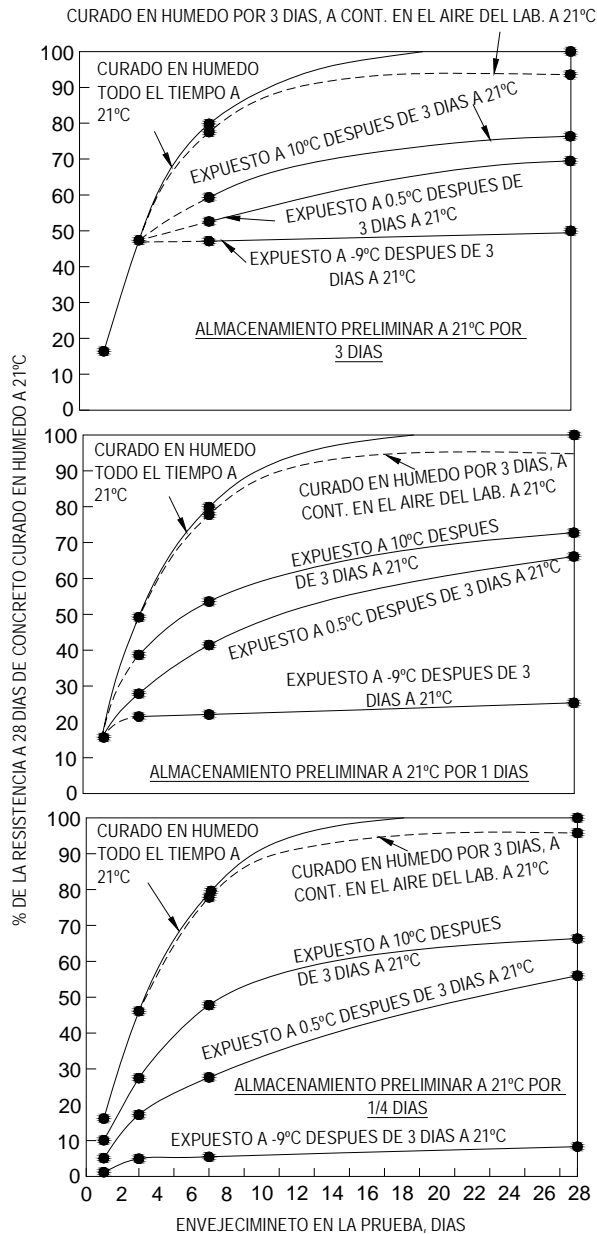


FIGURA 7.9 Resistencia relativa del hormigón según es alterada por la temperatura de almacenamiento. Relación A/C = 0.53 en peso, revenimiento de 8 a 13cm.

Fuente Referencia 3

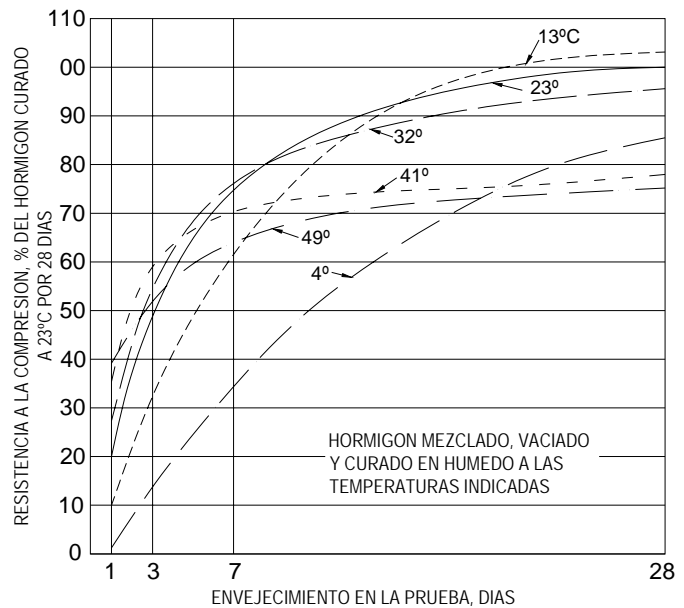


FIGURA 7.10 Efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia a la compresión de hormigón.

Fuente Referencia 3

7.6.4. EDAD DEL HORMIGÓN EN LA PRUEBA

Se ha demostrado que la resistencia a la compresión aumenta con el envejecimiento, hasta por 50 años, si existe humedad.

En la tabla 7.2 se muestra el desarrollo de las resistencias a la compresión, tracción y flexión, en condiciones de curado en húmedo, para hormigón hecho con diferentes tipos de agregado y con una relación A/C de 0.532, en peso. Los valores a los 28 días se toman como el 100% y los valores de todos los demás envejecimientos se basan en los de 28 días.

TABLA 7.2 DESARROLLO DE LA RESISTENCIA EN RELACIÓN A LA RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS

Tipo de prueba	Envejecimiento en la prueba				
	3 días	7 días	28 días*	3 meses	1 año
De compresión	35	59	100	135	161
De flexión	53	71	100	126	143
De tracción	46	68	100	121	150

Fuente Referencia 3

Relación A/C = 0.532

* Los valores a los 28 días se toman como el 100% y los valores de todos los demás envejecimientos se basan en los de 28 días.

7.7. RELACIONES ENTRE VARIOS TIPOS DE RESISTENCIA

Las resistencias a la compresión, a la tracción, a la flexión, al corte y de adherencia están todas relacionadas y, por lo general, un aumento o disminución en una de ellas se refleja de manera análoga en las otras, pero no necesariamente en la misma proporción.

Conociendo la resistencia a la compresión, puede obtenerse una aproximación de las resistencias a la flexión, corte y torsión, según especifican las diferentes normas.

A continuación se dan algunas relaciones entre resistencias, que pueden utilizarse a falta de resultados de ensayos:

según la EHE,

$$f_{ct,k}=0,21 (f_{ck})^{2/3} \text{ [MPa]} \text{ donde el valor de } f_{ck} \text{ esta en [MPa]} \text{ (Artículo 39)}$$

según la PCA,

$$\text{Resistencia a la tracción} = 0,4 \text{ a } 0,7 (f'_c)^{1/2} \text{ [MPa]}$$

$$\text{Resistencia a la flexión} = 0,7 \text{ a } 0,8 (f'_c)^{1/2}$$

La resistencia a la tracción es alrededor del 8 al 12% de la resistencia a la compresión.

La resistencia a la tensión hendedora es del 8 al 14% de la resistencia a la compresión.

La resistencia a la flexión suele ser de un 60 a un 100% mayor que el de la resistencia a la tracción.

La resistencia al corte es la misma que la resistencia a la tracción según lo explicado en el apartado 7.4.

7.7.1. PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A 28 DÍAS

Las especificaciones del hormigón suelen basarse en la resistencia requerida a la compresión con un envejecimiento de 28 días. Los métodos mejorados de programación de las operaciones de puesta en obra exigen métodos para anticipar el envejecimiento en el que el hormigón será bastante fuerte para todas las operaciones subsiguientes.

Una aproximación grosera de la resistencia a la compresión para diferentes envejecimientos, se muestra en la tabla 7.3:

TABLA 7.3 ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, CON RELACIÓN A LA RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS

Edad del Hº en días	3	7	28	90	360
Cemento Pórtland tipo I	0.4	0.65	1	1.2	1.35

Fuente Referencia 4

Un procedimiento completo, y más complicado, para predecir las resistencias a diferentes envejecimientos, se puede hallar en la ASTM C918.

7.8. GANANCIA DE RESISTENCIA

7.8.1. GANANCIA RETARDADA DE RESISTENCIA

Las ganancias seriamente retardadas de resistencia del hormigón se pueden deber a una amplia variedad de causas, en general asociadas a hormigón con materiales malos o malas prácticas respecto a éste. Para evitar un retardo serio en la resistencia es necesario prestar una atención particular a los siguientes aspectos:

1. Los agregados y el agua de mezclado deben estar limpios.
2. Deben determinarse los efectos de los aditivos retardadores y aceleradores para el hormigón que se use.

3. Se deben realizar una correcta dosificación y cumplirla durante la puesta en obra.
4. El hormigón se debe curar adecuadamente en condiciones de temperatura y humedad convenientes. No debe permitirse que el hormigón se congele hasta que haya desarrollado la resistencia requerida.

7.8.2. GANANCIA ACELERADA DE RESISTENCIA

Se puede obtener una alta resistencia temprana mediante el uso de mezclas más ricas en cemento; aditivos aceleradores, aditivos reductores de la cantidad de agua, elevadas temperaturas de curado al vapor a presiones normales (ver apartado 18.2.3) o a presiones elevadas (en autoclave).

Las temperaturas elevadas durante el curado en húmedo o el curado con vapor a baja presión, aceleran la razón de ganancia de resistencia en los primeros días, pero si las temperaturas son demasiado elevadas pueden tener un efecto adverso sobre las resistencias con más envejecimiento.

7.9. MÓDULO DE ELASTICIDAD

7.9.1. GENERALIDADES

El módulo de elasticidad, definido por la ecuación $E = \text{esfuerzo} / \text{deformación}$ es una medida de la rigidez, o sea la **resistencia del hormigón a la deformación**.

El hormigón no es un material verdaderamente elástico, pero el hormigón que ha endurecido por completo y se ha cargado en forma moderada tiene una curva de esfuerzo de compresión-deformación que, en esencia, es una recta dentro del rango de los esfuerzos usuales de trabajo.

El módulo de elasticidad del hormigón estructural normalmente varía entre 1.4×10^5 y $4.2 \times 10^5 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$ y se suele asumir como $2.1 \times 10^5 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$.

7.9.2. MÉTODO DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

En general, los módulos de elasticidad se determinan a partir de pruebas a la compresión de cilindros de hormigón. Los diferentes valores que pueden determinarse a partir de una prueba incluyen el módulo tangente inicial, el módulo secante y el módulo cuerda. Cada uno de estos valores se puede representar por la pendiente de la recta adecuada que se muestra en la figura 7.11.

Una ecuación de amplio uso para calcular el módulo de elasticidad, dado en el ACI 318M-02, relaciona el módulo de elasticidad con la resistencia a la compresión, f'_c [kg/cm^2], y el peso unitario del

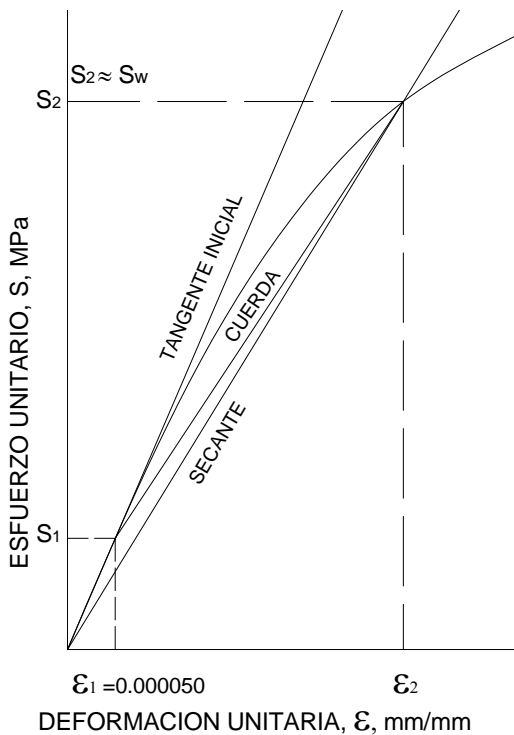


FIGURA 7.11 Curva Esfuerzo – Deformación para el hormigón.
Fuente Referencia 3

hormigón, w_c [kg/m³]. Esta ecuación es satisfactoria para valores de w_c entre 1500 y 2500 kg/m³.

$$E_c \left[\frac{kg}{cm^2} \right] = w_c^{1.5} 0.14 \sqrt{f'_c}$$

Para hormigón de peso normal el módulo de elasticidad E_c se puede considerar como:

$$E_c \left[\frac{kg}{cm^2} \right] = 15100 \sqrt{f'_c}$$

Modulo tangente.- Su valor es variable en cada punto y viene medido por la inclinación de la tangente a la curva

en dicho punto: $E_c = \frac{d\sigma}{dS}$. Cuando se toma en el punto

0,0 se denomina *Modulo Tangente Inicial* o *Modulo Inicial*.

Modulo secante.- Su valor es variable en cada punto y viene medido por la inclinación de la recta que une el

origen con dicho punto: $E_c = \frac{\sigma}{S}$

7.9.3. EFECTOS DE LAS VARIABLES SOBRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD (E_c)

Los mismos factores que causan las variaciones en la resistencia en el hormigón también provocan las variaciones en el módulo de elasticidad. La manera en que se realice el ensayo también afecta al valor de los resultados de E_c . La cantidad, tipo y gradación del agregado tienen efectos importantes sobre E_c .

El modulo de elasticidad del agregado tiene una relación directa en el E_c del hormigón, es decir un agregado con un modulo de elasticidad alto dará un hormigón con un modulo de elasticidad mayor.

7.9.4. RELACIONES ENTRE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD

En condiciones similares y para cargas menores que el 50% de la carga última, los módulos estáticos de elasticidad para la tracción, compresión y flexión son aproximadamente iguales.

7.10. RELACIÓN DE POISSON

La relación de la deformación lateral a la deformación longitudinal, dentro del rango elástico, para muestras cargadas axialmente se llama *Relación de Poisson*. Los valores de la relación de Poisson

se requieren para el análisis estructural y para el diseño de muchos tipos de estructuras. El método para determinar la relación de Poisson se detalla en la ASTM C469.

La mayor parte de los valores de la relación de Poisson que se han dado a conocer, hasta un envejecimiento de 50 años, caen dentro del rango de 0.15 a 0.25. A falta de datos experimentales, se puede utilizar un valor de 0.20.

7.11. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN BAJO CARGAS DINÁMICAS

En general, las propiedades mecánicas de los materiales estructurales mejoran cuando aumenta la rapidez de aplicación de la carga. No obstante, el módulo de elasticidad en el intervalo elástico no cambia. Para el hormigón, la resistencia dinámica última en compresión puede ser mucho mayor que la resistencia estática.

Bajo muchas repeticiones de carga, un elemento o una conexión entre elementos puede fallar por "fatiga" con un esfuerzo menor que el límite de fluencia del material.

En general, hay muy poca deformación aparente al comienzo de una falla por fatiga. Se forma una grieta en el punto de alta concentración de esfuerzos. Cuando se repite el esfuerzo, la grieta se extiende poco a poco hasta que se fractura el elemento sin que haya habido fluencia o cedencia mensurables. Aunque el material pueda ser dúctil, la fractura parece ser frágil.

7.11.1. FATIGA

Algunos materiales (por lo general los que poseen un punto de fluencia bien definido) tienen lo que se conoce como límite a la fatiga, que es el esfuerzo unitario máximo que se puede repetir un número indefinido de veces, en un rango definido, sin ocasionar daños estructurales. Generalmente, cuando no se especifica ningún intervalo, se entiende que el límite de fatiga es para un ciclo en el que el esfuerzo varía entre esfuerzos de tensión y compresión del mismo valor.

Cuando el hormigón está sometido a cargas fluctuantes en lugar de cargas sostenidas, su *resistencia a la fatiga*, es considerablemente menor que su resistencia estática. Cuando en hormigones simples se introducen esfuerzos cíclicos de compresión variando desde cero hasta el máximo esfuerzo, el límite de fatiga está entre el 50 y el 60 por ciento de la resistencia a la compresión estática, para 2,000,000 de ciclos. Para otros tipos de esfuerzos aplicados, tales como esfuerzo de compresión por flexión en vigas de hormigón armado o tensión por flexión en vigas no reforzadas o en el lado de tensión de vigas reforzadas, el límite de fatiga parece ser aproximadamente el 55 por ciento de la resistencia estática correspondiente. Sin embargo, estos datos deben usarse únicamente como guías generales. Se sabe que la resistencia a la fatiga del hormigón no solamente depende de su

resistencia estática sino también de las condiciones de humedad, de la edad y de la velocidad de aplicación de la carga.

La mayor parte de las fallas por fatiga de las vigas de hormigón armado parecen deberse a la falla del acero de refuerzo, asociada con severo agrietamiento y concentración de esfuerzos y efectos de abrasión posibles. Las vigas con refuerzo longitudinal crítico parecen tener una resistencia a la fatiga del 60 al 70% de la resistencia estática última, para alrededor de un millón de ciclos.

La mayor parte de las fallas por fatiga de las vigas de hormigón preesforzado se deben a la falla por fatiga de los alambres o torones de esfuerzo y están relacionadas con la magnitud y severidad del agrietamiento. Existe cierta evidencia para sugerir que las vigas preesforzadas son superiores a las vigas convencionales para resistir las cargas de fatiga.

7.11.1.1. MEJORA DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA

El diseño de miembros para que resistan cargas repetidas no puede efectuarse con la certeza con la que se diseñan los miembros sometidos a cargas estáticas. Concentraciones de esfuerzos pueden presentarse por una amplia variedad de razones y no es práctico calcular sus intensidades. Sin embargo, a veces es posible mejorar la resistencia a la fatiga de un material o reducir la magnitud de una concentración de esfuerzos por debajo de un valor mínimo que cause una falla por fatiga. A continuación se dan recomendaciones para conseguir dicho efecto:

1. Evitar detalles de diseño que ocasionen concentraciones severas de esfuerzos o distribuciones pobres de los mismos.
2. Proporcionar cambios graduales en las secciones.
3. Eliminar esquinas y ranuras agudas.
4. No usar detalles que generen restricciones muy localizadas.
5. Localizar los elevadores de esfuerzos inevitables en puntos cuyas condiciones de fatiga sean menos severas.
6. Diseñar las estructuras con trayectorias múltiples de carga o miembros redundantes, de manera que una grieta por fatiga en cualquiera de los miembros primarios no cause el colapso de la estructura entera.

7.12. DEFINICIONES

Las distintas normas definen, resistencias nominales, con las que se realizan los cálculos y los controles de calidad de los hormigones. En la tabla 7.4 se hace una comparación entre la diferente nomenclatura que tienen las 3 normas nombradas en este texto.

TABLA 7.4 DEFINICIONES DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SEGÚN LA CBH 87, EHE Y LA ACI.

ACI	EHE – CBH 87	Definición
Resistencia Especificada, f'_c	Resistencia característica de proyecto, f_{ck} , para el calculo este valor se divide entre un factor de seguridad y se vuelve en la resistencia de calculo f_{cd}	Valor adoptado en el proyecto para la resistencia a compresión, como base de los cálculos, a este valor se aplican los coeficientes de seguridad prescritos por la norma*.
\bar{X} promedio de los resultados de los ensayos	Resistencia característica estimada, $f_{c\ est}$ El 95 % de los resultados de las probetas debe igualar o superar f_{ck}	Valor obtenido de ensayar un número finito de probetas.
Resistencia promedio, f'_{cr}	Resistencia media, f_{cm}	Valor utilizado para el calculo de las proporciones del concreto (ver cap. 11)

* los coeficientes de la norma EHE (γ_c) se presentan en su artículo 15.3

* la ACI 318 presenta los factores de reducción de resistencia (ϕ) en su artículo 9.3

La determinación de \bar{X} y $f_{c\ est}$ se explicara en el capítulo 11, dosificación

Fuente elaboración propia en base a: referencia 6, 10, 11.

7.13. OTRAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Tipificación.- Los hormigones se tipifican, de acuerdo con su resistencia de proyecto a compresión, a los 28 días, en probetas cilíndricas normales, en la CBH 87, según la siguiente serie:

H12.5; H15; H17.5; H20; H25; H30; H35; H40; H45; H50; H55

Esta indica que los tipos H12.5 a H25 se emplean en estructuras de edificación, y los restantes de la serie encuentran su principal aplicación en obras importantes de ingeniería y en prefabricación.

La Norma EHE recomienda utilizar la siguiente serie:

20, 25, 30, 35, 40, 45, 50

En la cual las cifras indican la resistencia característica especificada del hormigón a compresión a 28 días, expresada en MPa; La resistencia de 20 MPa se limita en su utilización a hormigones en masa.

Resistencia mínima del hormigón en función de la del acero.- A fin de no usar aceros de resistencia muy alta con hormigones de baja resistencia, la resistencia del proyecto del hormigón, f_{ck} , no será menor que la indicada en la tabla siguiente, en función del tipo de acero:

TABLA 7.5 RESISTENCIA MÍNIMA DEL HORMIGÓN EN FUNCIÓN DEL TIPO DE ACERO

Tipo de Acero	Solicitación	Valor mínimo de la resistencia de proyecto del hormigón a los 28 días, f_{ck} MPa	Tipo de Hormigón
AH 215L	Estática	12.5	H 12.5
AH 400	Estática	15	H 15
	Dinámica	20	H 20
AH 500	Estática	17.5	H 17.5
	Dinámica	20	H 20
AH 600	Estática	20	H 20
	Dinámica	20	H 20

Características reológicas del hormigón.- La Reología es la rama de la Mecánica que estudia la evolución de deformaciones de un material, producidas por causas tensionales, a lo largo del tiempo.

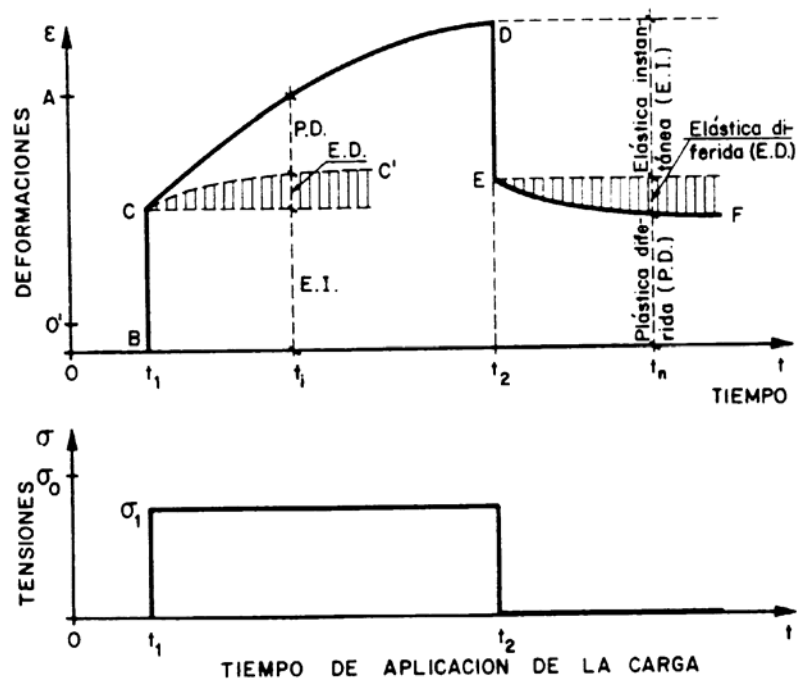


FIGURA 7.12 Deformación del hormigón.

Fuente Referencia 4

la carga aplicada a través del tiempo la deformación ira creciendo, al retirar la carga se recuperara la deformación elástica, (BC=CD), y al dejar la probeta descargada esta ira recuperando una parte creciente de la deformación.

Se pueden ver entonces las 3 deformaciones del Hormigón: la elástica instantánea, elástica diferida y plástica diferida.

En la tabla 7.6 se clasifican las deformaciones en las que se han hecho figurar además las deformaciones térmicas y las de retracción, independientes de las cargas exteriores.

Deformaciones.- Si se analiza una probeta, figura 7.12.

- 1º. Se carga y descarga inmediatamente, al aplicar la carga se presenta una deformación instantánea OA, al retirar la carga se mantiene una deformación remanente OO', siendo entonces O'A la deformación elástica.
- 2º. Si ahora cargamos la misma probeta con una carga menor a la aplicada en el punto 1º, se producirá una deformación elástica BC, y si mantenemos

TABLA 7.6 DEFORMACIONES DEL HORMIGÓN

	Dependientes de las cargas exteriores		Independientes de las cargas exteriores
	Instantáneas	Diferidas (fluencia)	
Reversibles	Elásticas Instantáneas	Elásticas diferidas	Térmicas
Irreversibles	Remanentes	Plásticas diferidas	Retracción

Elongabilidad del hormigón.- La deformación por rotura del hormigón en tracción vale aproximadamente, 0.01 a 0.015% y es una medida de su elongabilidad, es decir de su capacidad para soportar alargamiento sin romperse. Este valor llega hasta 0.04% en hormigones de alta relación A/C, poco curados y jóvenes.

BIBLIOGRAFÍA

1. NB 604:1994 Hormigones – Requisitos.
2. EHE (Instrucción de Hormigón Estructural) Artículo 30, Hormigones, http://www.mfom.es/cph/norma_ehe.html.
3. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) “Manual de la Construcción con Concreto”. 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
4. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) “Hormigón Armado”. 14ª ed., Gustavo Pili, SA, Barcelona.
5. NILSON A.H. (1999) “Diseño de Estructuras de Concreto”, 12ª ed,
6. EHE (Instrucción de Hormigón Estructural) Artículo 39, Características del Hormigón, http://www.mfom.es/cph/norma_ehe.html.
7. MERRITT F. S, LOFTIN M. K, RICKETTS J. T. (1999), “Manual del Ingeniero Civil” 3ª ed. en español, Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
8. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association “Design and Control of Concrete Mixtures”. 14ª ed., www.portcement.org
9. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)
10. ACI 318M-02/318RM-02(metric) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
11. CBH 87 Norma Boliviana del Hormigón Armado.

CAPITULO 8

PERMEABILIDAD Y ABSORCIÓN

8.1. CONSIDERACIONES GENERALES

En las estructuras hidráulicas, en donde la impermeabilidad constituye una gran preocupación, la permeabilidad puede ser más importante que la resistencia. La permeabilidad y la absorción también son importantes debido a su relación con las diversas acciones que dañan el hormigón.

El agua puede penetrar en un cuerpo poroso, como líquido o vapor, ya sea por atracción capilar, o impulsada hacia el interior de ese cuerpo bajo presión o introducida por una combinación de las anteriores. El movimiento del agua a través del cuerpo también puede comprender efectos osmóticos.

Para continuar con el capítulo se definirán tres conceptos inherentes a este.

Absorción es el proceso por el cual el hormigón ejerce atracción sobre los fluidos con los que está en contacto, de modo que las moléculas de estos penetren en el, llenando sus poros y capilares permeables.

Adsorción es la retención, adhesión o concentración en la superficie de un sólido, de sustancias disueltas o dispersas en un fluido. Por lo general, cuando un sólido (hormigón) se halla en contacto con una disolución, la sustancia disuelta tiende a concentrarse en la superficie de contacto. Lo mismo ocurre con los gases que llevan alguna sustancia en suspensión.

Permeabilidad del hormigón al agua o al vapor es la propiedad que permite el paso del fluido o vapor a través del hormigón.

Todas las mezclas de hormigón absorben algo de agua y son permeables hasta cierto punto. Las pruebas con cargas hidrostáticas han indicado que ni el cemento Portland ni las mezclas hechas a partir de él son absolutamente impermeables. Sin embargo, existe abundante evidencia que indica que el hormigón y el mortero pueden hacerse tan impermeables que ninguna filtración ni humedad resulten visibles sobre la superficie opuesta a aquella por la que entra el agua.

8.2. LA ESTRUCTURA POROSA DEL HORMIGÓN

El hormigón contiene una amplia variedad de poros entre sus componentes y dentro de estos mismos. Los poros en los agregados sufren sólo pequeños cambios con el tiempo, pero los poros en la pasta de cemento están sujetos a grandes cambios, en especial durante los primeros días de la pasta.

En una pasta de cemento pura recién mezclada, se cuenta con espacios llenos de agua para la formación de los productos de la hidratación. Este espacio, originalmente en función de la relación A/C de la pasta, es reducido en forma continua por el volumen del gel hidratado. El sistema capilar es esa parte del espacio original lleno de agua que no se llena con gel hidratado. De este modo, resulta evidente que la hidratación reduce el tamaño y volumen de los poros capilares e incrementa el volumen del gel, y que el proceso es continuo a medida que progresa la hidratación. Se ha afirmado que, si el espacio capilar es pobre (relación A/C menor que 0.40 en peso), al final el gel llenará todo el espacio original del agua y dejará una pasta sin poros capilares. Conforme se aumenta la relación A/C y a medida que se disminuye el grado de hidratación, se incrementa el volumen de los poros capilares.

Asociados con los agregados se tienen los vacíos que están en contacto con las superficies inferiores de los agregados gruesos, los cuales resultan del flujo hacia arriba del agua a través del hormigón plástico. La tendencia de la pasta de cemento a asentarse durante el estado plástico conduce a la producción de vacíos entre las partículas de arena. Además el hormigón suele contener aire ocluido y huecos de aire incluido adicionado.

8.3. PRUEBAS DE ABSORCIÓN Y PERMEABILIDAD

La prueba de absorción se lleva a cabo sumergiendo una probeta de hormigón, en agua durante 48hrs, pesarla después de que se seca su superficie y pesarla una vez más después de secarla al horno. Entonces se puede calcular la absorción al dividir la pérdida de peso entre el peso obtenido después de haberla secado al horno. La absorción total se considera como un criterio de durabilidad del hormigón.

La prueba de permeabilidad del hormigón suele obtenerse por la determinación de la cantidad de agua que se impulsa para que fluya hacia adentro de una muestra durante un intervalo dado de tiempo, o bien, por la determinación de la cantidad de agua que fluye hacia afuera de la superficie opuesta, expuesta al aire, en un intervalo dado de tiempo.

La filtración, dada con frecuencia en $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{hora}$, se puede calcular con base en la ley de Darcy para el flujo viscoso.

Aun cuando el objetivo de las pruebas de permeabilidad es determinar las características de permeabilidad del hormigón, estas pruebas pueden tener poca relación directa con lo impermeable de la estructura, en virtud de la presencia de grietas y juntas malas. Sin embargo, además de proporcionar información acerca de las propiedades de permeabilidad del hormigón, la prueba también es útil en la determinación de los efectos corrosivos de las aguas de filtración.

8.4. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA PERMEABILIDAD

8.4.1. MATERIALES

Las pastas de cemento con un envejecimiento y relación A/C dados, que contienen cementos de hidratación lenta (menor modulo de finura) son más permeables que las hechas con cementos de rápida hidratación (mayor modulo de finura), por tanto la impermeabilidad disminuye al aumentar la finura.

La permeabilidad, así como la resistencia, esta relacionada con la relación A/C como se indica en la figura 8.1. La permeabilidad del hormigón aumenta con una razón rápida a medida que la relación A/C se hace mayor que 0.65, en peso. Para materiales y condiciones dados, un aumento en la relación A/C de 0.40 a 0.80 puede incrementar la permeabilidad alrededor de 100 veces.

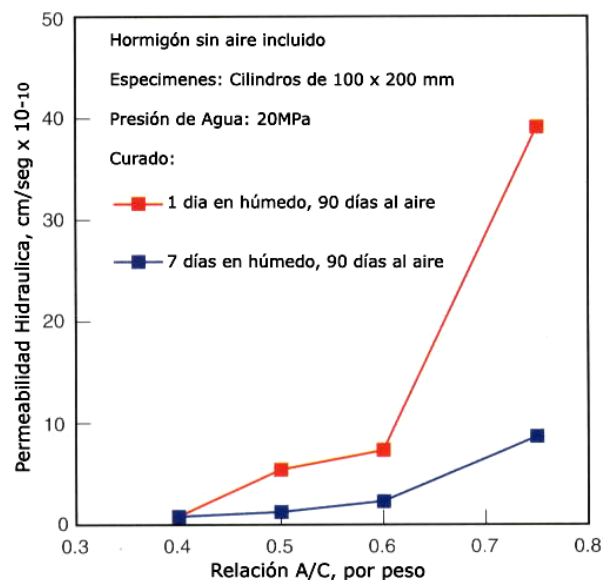


FIGURA 8.1 Relación entre la permeabilidad hidráulica, la relación A/C y el curado inicial de especímenes de hormigón

Fuente: Referencia 3

Con una relación A/C dada, la permeabilidad aumenta conforme se hace mayor el tamaño máximo del agregado, probablemente debido a que los huecos llenos de agua que se encuentran en el lado inferior del agregado grueso aumentan a medida que se incrementa el tamaño máximo de ese agregado.

8.4.2. VACIADO Y CURADO

El manejo, vaciado y compactación del hormigón adecuadamente dosificado en el encofrado es un paso importante en la producción de hormigón impermeable. Deben aplicarse toda clase de medidas para evitar la segregación, que puede causar la formación de cangrejas o de una estructura porosa.

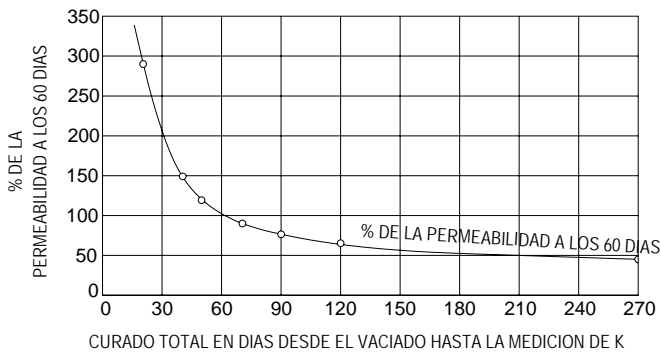


FIGURA 8.2 Efecto de la amplitud del periodo de curado sobre la permeabilidad

* K = Factor de Permeabilidad

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 1

A/C=0.5 tendrá una baja permeabilidad después de 7 días de curado, con una relación A/C=0.65 requerirá 14 días y el hormigón con una relación A/C de 0.80 no alcanzara esa condición incluso después de 28 días de curado.

En la figura 8.2 se muestra el efecto de la amplitud del periodo de curado sobre la permeabilidad. Resulta evidente que el curado durante los primeros días del hormigón es especialmente eficaz en la reducción de la permeabilidad.

El tiempo de curado para lograr un hormigón impermeable depende de la relación A/C. Por ejemplo un hormigón con una relación

8.5. HERMETICIDAD AL AGUA E IMPERMEABILIZACIÓN

Impermeabilización se refiere a cualquier método para hacer que el hormigón sea impermeable al vapor de agua o al agua a baja presión.

Hermético se refiere a cualquier método para hacer que el hormigón sea impermeable al agua que puede estar sometida a alta presión.

8.5.1. APLICACIONES SUPERFICIALES

Los materiales que se emplean como tratamientos superficiales para el hormigón se pueden clasificar, según como actúan, 1.como aquellos que penetran en la superficie del mismo y llenan los poros y 2.los que forman películas superficiales.

Los materiales que penetran pueden ser inertes que sencillamente llenan los poros, o bien, pueden reaccionar con los componentes que se encuentran en la superficie del hormigón para formar compuestos de mayor volumen y con mayor capacidad para llenar los poros. Estos materiales también se usan como endurecedores para evitar la formación de polvo y la desintegración de la superficie.

Entre los agentes superficiales más eficaces se encontraron morteros de cemento Pórtland aplicados y curados en forma adecuada, emulsiones de asfalto, destilados pesados del petróleo disueltos en solventes volátiles, algunos tipos de selladores de silano y acrílico y recubrimientos transparentes de aceite de linaza o de palo.

En el apartado 4.2.6 se desarrolla aditivos impermeabilizantes para hormigón; y la descripción de los productos desarrollados por Sika, como ser Icol Denso, Sikaguard 670W, Conservado 5, que se desarrollan en el ANEXO 1.

8.6. RECOMENDACIONES

Se puede mejorar las condiciones de permeabilidad, y por ende la durabilidad, siguiendo las siguientes recomendaciones:

- Utilizar relaciones A/C lo más bajas posibles, compatibles con una adecuada trabajabilidad del hormigón.
- Someter el hormigón a un buen curado de manera que la hidratación continua del cemento haga que el tamaño de los vacíos se reduzca. El hormigón curado sin interrupción es menos permeable, no sólo por la no presencia de fisuras, sino también porque al evitar la evaporación temprana del agua de exudación, se previene la formación de redes capilares que permitan la libre circulación de agua y por ende de las sustancias agresivas tales como los sulfatos y las soluciones ácidas.
- Dosificar la óptima cantidad de agua de mezclado.
- Usar cemento con alto grado de finura.
- Emplear agregados bien gradados, de tal forma que se obtengan hormigones más densos y por lo tanto menos porosos.
- Adicionar aditivos tales como las puzolanas, inclusores de aire, y como es obvio, aditivos para reducir la permeabilidad.
- Efectuar tratamientos de superficie, especialmente cuando el hormigón está sujeto a la presión del agua.

BIBLIOGRAFÍA

1. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) "Manual de la Construcción con Concreto". 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
2. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". 14ª ed., Gustavo Gili, SA, Barcelona.
3. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association "Design and Control of Concrete Mixtures". 14ª ed., www.portcement.org

CAPITULO 9

DURABILIDAD

9.1 INTRODUCCION

La Durabilidad del cemento hidráulico se define como la capacidad para resistir la acción del medio ambiente, los ataques químicos, la abrasión y otras condiciones de servicio; de tal manera que sus características y propiedades se mantengan a lo largo de su vida útil.

La durabilidad es una propiedad tan importante como la resistencia misma, y por ello merece ser considerada con especial interés.

9.2 INFLUENCIA DEL MEDIO AMBIENTE SOBRE LA DURABILIDAD

Un hormigón durable debe mantener su forma original, calidad y serviciabilidad al ser expuesto al medio ambiente. Es claro que la durabilidad de un elemento de hormigón depende de sus propiedades y de las prácticas de puesta en obra, pero también es función de las condiciones que lo rodean y por esto es importante estudiar muy bien el medio ambiente y las características de servicio a las que estará sometido, para diseñar una mezcla económica que presente un buen comportamiento.

Las condiciones medioambientales que afectan la durabilidad del hormigón pueden ser de origen químico o físico:

Ataque físico: Congelación y deshielo, Humedecimiento y secado, Fuego, Cambios de temperatura y Abrasión.

Ataque químico: Ataque por ácidos, Ataque por sulfatos, Reacción Álcali-agregados, Carbonatación del cemento, Corrosión del acero y Efecto de la Disolución del Hidróxido de Calcio.

Generalmente estos ataques no se presentan de manera individual, sino que lo hacen en combinación y se manifiestan por la aparición de manchas, eflorescencias o fisuras.

Es importante identificar todas las causas potenciales de deterioro antes de definir las características de la mezcla de hormigón o las medidas de protección que se deben tomar.

A continuación se realiza un pequeño desarrollo de cada uno de estos ataques. Para un desarrollo mas amplio en cada uno de estos dirigirse a la ACI 201.2R

9.3 ATAQUE FÍSICO

9.3.1 CONGELACIÓN Y DESHIELO

Durante la congelación y el deshielo, la pasta de cemento, el agregado, o ambos, pueden resultar dañados por el aumento de volumen que sufre el agua en su paso de líquido a sólido, pudiéndose producir esfuerzos que pueden causar expansión permanente e incluso desintegración.

Al disminuir la temperatura de un hormigón saturado, el agua que se encuentra dentro de los poros aumenta de volumen por congelación, produciendo expansión y fisuras en el elemento. Esta condición se vuelve crítica cuando los ciclos congelación y deshielo se hacen repetitivos, ya que su efecto es acumulativo.

Todos los hormigones contienen por lo general entre 0.5 y 1.5% de aire atrapado, lo cual es relativamente ineficaz para aumentar la resistencia a la congelación y el deshielo. Sin embargo, la inclusión de aire en el hormigón, dependiendo del tamaño máximo del agregado, como se muestra en la tabla 9.1, aumenta mucho la resistencia a la congelación y el deshielo. La información sobre este tipo de adición se da en el apartado 4.2.5.

TABLA 9.1. CONTENIDO TOTAL DE AIRE INCLUIDO PARA UN HORMIGÓN RESISTENTE A LA CONGELACIÓN

Tamaño máximo de agregado, mm	Contenido de aire, %	
	Exposición severa	Exposición moderada
9.5	7.5	6
12.5	7	5.5
19	6	5
25	6	4.5
37.5	5.5	4.5
50	5	4
75	4.5	3.5

Fuente: Referencia 2

9.3.2 HUMEDECIMIENTO Y SECADO

En estructuras hidráulicas, esta es una de las principales causas de deterioro, ya que produce expansiones y contracciones creando condiciones de agrietamiento y descascaramiento del hormigón, al igual que pueden aumentar la corrosión del acero de refuerzo.

Cuando un elemento de hormigón está sujeto a ciclos de humedecimiento y secado, se presentan eflorescencias en su superficie, las cuales son el resultado del ingreso del agua a través del material.

La eflorescencia es mas un problema estético que de durabilidad, pero indica que está ocurriendo

lixiviación¹ dentro del hormigón. Su exceso aumenta la porosidad, disminuye la resistencia e incrementa la vulnerabilidad a los químicos agresivos.

La tasa de lixiviación depende de la cantidad de sales disueltas contenidas en el agua que se percola². Las aguas blandas, tales como el agua de lluvia, son las más agresivas mientras que las aguas duras que contienen grandes cantidades de calcio son menos peligrosas. La temperatura del agua también se debe considerar, porque el hidróxido de calcio es más soluble en agua fría que en agua caliente.

Cuando el agua libre en el hormigón se satura con sales, éstas se cristalizan en el hormigón cerca de la superficie en el proceso de secado y esta cristalización puede ejercer suficiente presión como para causar descostramiento de la superficie. Las soluciones salinas corroen el acero con más rapidez que el agua simple.

En las estructuras que van a quedar sujetas a la humidificación y secado frecuentes por estas soluciones, es esencial usar un hormigón impermeable y colocar un recubrimiento suficiente sobre el acero y es posible que, como una precaución adicional, sea recomendable dar algún tratamiento superficial (apartado 8.5.1).

9.3.3 CAMBIOS DE TEMPERATURA

El calor de fraguado del cemento produce tensiones internas importantes en elementos de gran masa de hormigón. Debido a la escasa conductividad térmica de este, el calor de hidratación se disipa con gran lentitud y como el proceso de enfriamiento del hormigón masivo puede durar varios meses, las tensiones térmicas que se desarrollan en el seno del material pueden llegar a superar su resistencia a la tracción y fisurarlo. Si el elemento tiene poco espesor, el equilibrio térmico con el ambiente se alcanza en las primeras edades, cuando el hormigón se encuentra todavía en el estado plástico, lo que le permite absorber las tracciones que puedan originarse por el gradiente térmico, sin riesgo de fisuras.

9.3.4 FUEGO

En términos generales, el hormigón tiene buenas propiedades de resistencia al fuego, siendo este uno de sus méritos como material estructural.

La resistencia al ataque del fuego depende principalmente de tres factores, a saber: el tipo de

¹ Separación de las partes solubles de las insolubles.

² Dicho de un líquido: Moverse a través de un medio poroso.

agregados y contenido de humedad, el tipo de cemento y el espesor del elemento de hormigón.

En el hormigón armado sujeto al fuego, las capas superficiales calientes tienden a separarse y descascararse de la parte de la estructura más fría, en consecuencia, se produce la formación de grietas en las juntas en las paredes de hormigón mal compactadas o en la zona de las barras de refuerzo. Sin embargo, la pérdida de resistencia comienza aproximadamente a los 330°C, y aún a los 500°C se considera que el hormigón conserva el 80% de su resistencia inicial. Una vez que el refuerzo queda al descubierto, se calienta rápidamente con la consecuente pérdida de resistencia. El acero dulce pierde aproximadamente el 50% de su resistencia a 600°C mientras que el acero pretensado sufre la misma pérdida a 400° C.

Una alta resistencia al fuego es posible con la elaboración de hormigones refractarios, esto se logra con el uso de un cemento con alto contenido de alúmina, pero con el problema de que este no puede utilizarse para fines estructurales.

La Norma ASTM E119 establece un método de ensayo para medir la resistencia del hormigón al fuego, de la misma manera la ACI 216R da una guía para determinar la resistencia al fuego según el elemento.

9.3.5 ABRASIÓN

Esta propiedad es importante en elementos sometidos a tráfico, deslizamientos y rozamiento como son los pavimentos, pisos, túneles y estribos de puentes, etc.

El desgaste de las superficies de hormigón se ha clasificado como sigue:

- 1) Desgaste sobre los pisos de hormigón debido al tránsito normal a pie, movimiento de camiones ligeros y resbalamiento de objetos.
- 2) Desgaste sobre superficies de carreteras de hormigón debido a vehículos con y sin cadenas.
- 3) Desgaste en construcciones subacuáticas debido a la acción del material abrasivo acarreado por el agua en movimiento.
- 4) Desgaste en estructuras hidráulicas en donde se encuentra presente un alto gradiente hidráulico (conocido como erosión por cavitación).

La **cavitación** es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido pasa a gran velocidad por una superficie terminada en una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido en la zona de la arista. Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido, a la temperatura que se encuentra dicho líquido, de tal forma que las moléculas que lo componen

cambian inmediatamente de estado líquido a vapor. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implosionan (el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, «aplastándose» bruscamente las burbujas, produciéndose presiones tan elevadas como de 7000 kg/cm^2) produciendo una estela de gas, y un rápido desgaste de la superficie que origina este fenómeno, lo que, con el tiempo, da lugar a picaduras y agujeros en la superficie del hormigón. Los efectos de la cavitación han causado daños severos a las estructuras hidráulicas. Aparentemente, el daño por cavitación no es común en conductos abiertos con velocidades del agua de menos de 12 m/s , en cambio en los conductos cerrados, velocidades tan bajas como de 7.6 m/s pueden causar picadura.

Se han desarrollado una gran variedad de pruebas de abrasión y de impacto con el fin de suministrar información para fines especiales. Las normas ASTM C418, C779 y C944 suministran las pruebas para determinar la resistencia a la abrasión del hormigón.

Se disminuye el desgaste de superficies para las que no se usó encofrado, mediante la aplicación de presión a través de un fuerte aplanado de la superficie de hormigón, después de que empieza a fraguar. Pueden mejorarse las propiedades relativas a la abrasión de los pisos de hormigón endurecido mediante:

- el uso de endurecedores de la superficie,
- la adición, en la capa superficial, de arena dura o arenilla de hierro
- la aplicación de pintura.

9.3.5.1 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

- Deben evitarse el compactado excesivo y el aplanado apresurado de la superficie del hormigón para prevenir la formación de un mortero con exceso de arena y muy húmedo en esa superficie.
- La resistencia a la abrasión aumenta con la resistencia a la compresión hasta alrededor de 400 kg/cm^2 .
- El aire incluido reduce la resistencia a la abrasión y, en consecuencia, en general la cantidad de aire incluido no debe sobrepasar el 4% cuando se desea una buena resistencia a la abrasión.

9.4 ATAQUE QUÍMICO

El hormigón tiene un buen desempeño frente a varias condiciones atmosféricas, a la mayor parte de las aguas y de los suelos que contienen químicos agresivos, y a muchas clases de exposición a químicos. Empero, existen algunos entornos químicos bajo los cuales la vida útil, de incluso el mejor

hormigón, será corta a menos que se tomen medidas específicas para prevenir el deterioro o reducir la velocidad al cual este se da.

9.4.1 ATAQUE POR ÁCIDOS

En general el cemento Pórtland no tiene una buena resistencia al ataque de los ácidos; aunque algunos ácidos débiles pueden ser tolerados, especialmente si su exposición es ocasional.

Los ácidos inorgánicos están presentes en la atmósfera (lluvia ácida³) y los ácidos orgánicos están en las aguas superficiales y freáticas procedentes de las industrias manufactureras, ensilajes agrícolas, productos de fermentación, productos de pulpa de madera o caña de azúcar, destilerías, aguas de minas, etc. Algunos suelos, como la Turba, y suelos arcillosos, pueden contener sulfato de hierro (FeS) el cual luego de oxidarse, produce ácido sulfúrico, y luego puede reaccionar y producir el ataque por sulfatos (apartado 9.4.2).

El deterioro de los morteros y hormigones en servicio expuestos a ácidos, es principalmente el resultado de la reacción entre estos químicos y el hidróxido de calcio del cemento Pórtland hidratado. En la mayor parte de los casos la reacción resulta en la formación de compuestos de calcio que son lavados por la solución acuosa. El ácido fosfórico es una excepción ya que las sales de calcio resultantes son insolubles en agua y por esto no son removidas inmediatamente de la superficie del hormigón.

Además del deterioro del hormigón, los ácidos pueden llegar hasta el acero de refuerzo, por los poros y/o por grietas, y ocasionar su corrosión, con consecuencias lamentables para la estructura.

9.4.1.1 EFECTO DE LAS AGUAS NEGRAS

Excepto en presencia de ciertos desechos industriales, el ataque directo de las aguas negras es pequeño ya que las aguas de este tipo y el agua de desecho usuales son casi neutras, con sólo una ligera variación, hacia arriba o hacia abajo, de un pH de 7.0. Como consecuencia, que se puedan usar hormigón o mortero en la construcción de alcantarillado depende del carácter de las aguas negras y de las características de operación.

Por ejemplo si las aguas negras son de tal naturaleza que emiten un fuerte olor a sulfuro de

³ Toda precipitación en forma de agua es ligeramente ácida, pero se denomina lluvia ácida a aquella con pH inferior a 5,6. Esta produce corrosión en metales y de construcciones de hormigón, las cuales deben ser continuamente restauradas.

hidrógeno, se formará ácido sulfúrico de fuerza suficiente como para atacar los compuestos de cal del hormigón y producir desintegración arriba del nivel del agua, esto especialmente en climas calientes.

9.4.1.2 EFECTO DE OTROS ÁCIDOS

En los casos en los que intervienen ácidos fuertes, se deben usar materiales o suministrar un tratamiento o recubrimiento que protejan la superficie. Los ataques comunes por ácido del hormigón se deben a los ácidos láctico y acético, en las plantas procesadoras de alimentos. Estos ataques son comparativamente suaves pero persistentes, que conducen al ablandamiento de los pisos de trabajo y pueden requerir reparación o reemplazo a intervalos periódicos. También es bastante común el ataque por ácido acético de los silos de hormigón debido al ensilaje.

Las bacterias y los hongos encuentran buenas condiciones para su crecimiento en los pisos, y paredes de las plantas procesadoras de alimentos. Estos agentes causan daños por acción mecánica y por secreción de ácidos orgánicos.

9.4.1.3 PROTECCIONES

La resistencia al ataque de los ácidos se puede mejorar si se deja secar el hormigón antes de que quede expuesto, ya que se forma una capa de carbonato de calcio que bloquea los poros y reduce la permeabilidad en la parte superficial. Existen también tratamientos superficiales con alquitrán de hulla, pinturas bituminosas, resinas epóxicas, silicofluoruro de magnesio y otros agentes que han demostrado resultados altamente satisfactorios. Hay que tener en cuenta que el grado de protección de los diferentes tratamientos varía, por ello es importante que la capa protectora producida por el método utilizado permanezca sin deteriorarse por agentes mecánicos, de tal forma que se hace necesario inspeccionar y renovar el recubrimiento.

9.4.2 ATAQUE POR SULFATOS

Los sulfatos de sodio, potasio y magnesio, presentes en los subsuelos y agua con álcalis, son muchas veces los responsables del deterioro de las estructuras de hormigón. La causa del deterioro puede tener dos orígenes:

1. en primer lugar, porque los sulfatos reaccionan químicamente con la cal y el aluminato de calcio hidratados en la pasta de cemento. Dichas reacciones van acompañadas de una considerable expansión, que ocasionan esfuerzos de tracción internos y que culminan con agrietamiento y rompimiento de la masa de hormigón.
2. La segunda causa se presenta cuando el hormigón está en contacto con aguas alcalinas, lo

cual produce la deposición de cristales de sulfato en los poros y canales capilares como consecuencia de la evaporación. El crecimiento de los cristales tiene lugar cuando se tiene un ciclo de humedecimiento y secado que puede eventualmente llenar los poros y desarrollar presiones suficientes para la rotura del hormigón.

La resistencia del hormigón a la acción de los sulfatos puede mejorarse mucho de varias maneras:

1. Un cemento puzolanico con un contenido del 15 al 30% de puzolana puede ser muy eficaz, para cuando se tienen presentes más del 2% de sulfatos en el suelo y más de 10000 ppm (partes por millón de masa) de sulfatos en el agua.
2. Tratar en autoclave los productos de hormigón, a 175°C o más, mejora la resistencia a los sulfatos.
3. Todos los cementos normales desarrollan completa desintegración dentro de uno o dos años, pero con los cementos de bajo contenido de C_3A , la resistencia al deterioro se prolonga a períodos mucho más largos.
4. La resistencia a la desintegración por el crecimiento de cristales, se logra mediante el uso de un hormigón denso, de muy baja permeabilidad, elaborado con una relación agua-cemento baja y preferiblemente con inclusión de aire.

La velocidad y severidad de los ataques por sulfatos aumentan al aumentar la temperatura.

El hormigón seco no es atacado en suelos secos que contienen sulfatos.

9.4.3 REACCIÓN ÁLCALI AGREGADO

Las reacciones entre ciertos componentes intensamente silíceos de los agregados y cementos que tienen contenidos elevados de álcali conducen a pérdida de resistencia, expansión excesiva, agrietamiento y desintegración. Las expansiones asociadas con esta reacción pueden cerrar las juntas de expansión, causar que los miembros estructurales se desplacen con respecto a los otros, provocar que las maquinarias se salgan de su ubicación y otros efectos indeseables.

Esta reacción se puede controlar o reducir:

- mediante el empleo de cementos con un contenido de álcali de menos del 0.60%, expresado como Na_2O equivalente;
- con el uso de agregados no reactivos;

- con la aplicación de ciertos materiales puzolánicos finamente molidos que reaccionen químicamente con los álcalis antes de que ataquen los agregados reactivos.

En caso de estar utilizando un agregado cuestionable, se puede reemplazar un 30% o más, en peso, para el control parcial de la expansión indeseable.

Algunos agregados conocidos que reaccionan con el álcali del cemento son: el sílice opalino, la caliza sílicea y en general rocas con alto contenido de sílice. En consecuencia, cuando se requiere aprovechar una fuente de agregados cuyo comportamiento sea desconocido, es muy aconsejable hacer ensayos petrográficos y exámenes químicos, así como ensayos de expansión de morteros.

9.4.4 CARBONATACIÓN

Cuando el hormigón o el mortero están expuestos al dióxido de carbono (CO_2), se genera una reacción con el calcio de los compuestos del cemento para formar carbonato de calcio, esta reacción viene acompañada de contracción irreversible y de un aumento significativo en peso. Todos los constituyentes del cemento Pórtland hidratado son susceptibles a la carbonatación.

Los resultados pueden ser beneficiosos o dañinos, dependiendo del tiempo, grado, y extensión de exposición en que ocurra esto. Por un lado la carbonatación intencional durante la producción del hormigón puede mejorar la resistencia, dureza y estabilidad volumétrica de los productos del hormigón. Sin embargo en otros casos, la carbonatación puede resultar en deterioro y descenso en el pH de la pasta de cemento resultando en la corrosión del refuerzo cercano a la superficie.

La exposición al CO_2 durante el proceso de endurecimiento debido a la exposición a emisiones de gas de equipos u otras fuentes pueden producir superficies altamente porosas que quedaran expuestas a ataques químicos más profundos. Esta exposición puede afectar a la superficie acabada de las losas, dejando una superficie suave, polvorienta y menos resistente al uso, la única manera de eliminar la mala superficie es por esmerilado de la misma.

9.4.4.1 CAUSAS DE LA CARBONATACIÓN

El CO_2 puede provenir de la atmósfera o de ser transportado disuelto en el agua.

Carbonatación atmosférica.- La reacción del cemento Pórtland hidratado con el CO_2 en el aire es un proceso generalmente lento, que depende en gran parte, de la humedad relativa del ambiente, temperatura, permeabilidad del hormigón y la concentración del CO_2 .

Los mayores índices de carbonatación ocurren cuando la humedad relativa se mantiene entre 50 y

75%, ya que por debajo del 25% el grado de carbonatación se considera insignificante y encima de 75%, la humedad en los poros restringe la penetración del CO_2 , por lo que la carbonatación es nula.

El hormigón permeable sufre una acción de carbonatación más rápida y extensa que el hormigón compacto. Una baja relación A/C y una buena consolidación reducen la permeabilidad y restringe la carbonatación en la superficie.

En áreas industriales con altas concentraciones de CO_2 en el aire se producen mayores grados de carbonatación.

Si no es posible mantener el contenido de CO_2 del aire en un nivel bajo, puede protegerse el hormigón fresco con un compuesto para curado de membrana, o bien, aplicarle un sello superficial tan pronto como se pueda, para proteger el hormigón durante las primeras 24hrs.

Carbonatación por aguas subterráneas.- El CO_2 absorbido por la lluvia ingresa a las aguas subterráneas como ácido carbónico. Más CO_2 , junto con ácido húmico, provenientes de los desechos orgánicos en el suelo, dan por resultado altos niveles del CO_2 libre. Mientras que tales aguas son generalmente ácidas, la agresividad no puede determinarse solamente por el pH ya que la reacción con carbonatos en el suelo produce un equilibrio con el bicarbonato del calcio, que puede dar lugar a soluciones con un pH neutro, pero que contiene cantidades significativas de CO_2 agresivo.

El grado del ataque, similar al del CO_2 en la atmósfera, depende de las características del hormigón y la concentración del CO_2 agresivo. Actualmente no se han definido valores límites debido a las diversas condiciones en la construcción subterránea. Pero se ha concluido, que agua que contiene más de 20ppm de CO_2 agresivo pueden producir carbonatación rápida de la pasta hidratada de cemento. Por otra parte, las aguas en movimiento libre con 10ppm o menos de CO_2 agresivo pueden también dar lugar a carbonatación significativa.

9.4.5 CORROSIÓN DEL ACERO

Con el objeto de proteger las armaduras contra la corrosión, se debe proporcionar un recubrimiento mínimo de hormigón al acero de refuerzo, este recubrimiento se mide desde la cara externa del elemento hasta la superficie mas externa de la barra de acero, a la cual se aplica este recubrimiento.

Es posible que se requiera protección especial cuando el hormigón se encuentra dentro del alcance de las mareas y queda expuesto a agua que contiene álcalis o cloruros de sales.

En los ambientes corrosivos u otras condiciones severas de exposición, se debe aumentar adecuadamente el espesor de la protección del hormigón, y tomar en consideración la densidad y la

no porosidad de hormigón de protección, o proporcionar otro tipo de protección. Para los miembros preesforzados expuestos a ambientes corrosivos u a otras condiciones severas de exposición, el recubrimiento mínimo será aumentado en un 50%.

TABLA 9.2. RECUBRIMIENTOS MÍNIMOS PARA EL REFUERZO SEGÚN LA ACI 318

Caso	Recubrimiento mínimo [cm]	
	Hormigón Armado H°A°	Hormigón preesforzado H°P°
Hormigón vaciado directamente en el suelo y expuesto permanentemente a el suelo	7,5	7,5
Hormigón expuesto al suelo o a la intemperie:		
Barras Ø20 y mayores	5	-
Barras Ø 16 y menores	4	-
Losas, muros, viguetas	-	2,5
Otros elementos	-	4
Hormigón no expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo:		
Losas, muros, viguetas:		
Barras Ø 35 y menores	2	2
Vigas, columnas:		
Refuerzo principal	4	4
anillos, estribos, espirales,	4	2,5
Cáscaras, placas plegadas:		
Barras Ø 20 y mayores	2	-
Barras Ø 16 y menores	1,5	1
Otro tipo de refuerzo	-	d_b^* pero no menor a 2,0

d_b = diámetro nominal de una barra, alambre o cable de refuerzo [cm]

La cubierta de hormigón como protección del refuerzo contra el clima y otros efectos, se mide desde la superficie del hormigón hasta la superficie exterior del acero, a la cual se aplica el recubrimiento. El recubrimiento mínimo para un miembro estructural, debe medirse hasta el borde mas externo del refuerzo, ya sea transversal o longitudinal. En el caso de elementos postensados, hasta el borde de las vainas.

La condición " Hormigón expuesto al suelo o a la intemperie" se refiere a la exposición directa a los cambios de la humedad y de temperatura.

Fuente: Referencia 2

9.4.6 EFECTO DE LA DISOLUCIÓN DEL HIDRÓXIDO DE CALCIO

En el proceso de hidratación del cemento, se forma hidróxido de calcio soluble. Este material es disuelto con facilidad por el agua que no contenga cal y que contenga bióxido de carbono disuelto. El agua de la nieve en las corrientes montañosas es en particular agresiva porque es relativamente pura, está fría y contiene bióxido de carbono que produce una solución suave de ácido carbónico, con una capacidad mayor para disolver el hidróxido de calcio que el agua pura. Como resultado de esta acción, las superficies de estructuras que conducen agua desarrollan un aspecto arenoso áspero y pueden sufrir una reducción en su capacidad.

TABLA 9.3. RECUBRIMIENTOS MÍNIMOS SEGÚN LA EHE

Resistencia característica del hormigón [MPa]	Tipo de elemento	RECUBRIMIENTO MÍNIMO [mm] SEGÚN LA CLASE DE EXPOSICIÓN (**)									
		I	Ila	Ilb	IIla	IIlb	IIlc	IV	Qa	Qb	Qc
$25 \leq f_{ck} < 40$	general	20	25	30	35	35	40	35	40	(*)	(*)
	elementos prefabricados y láminas	15	20	25	30	30	35	30	35	(*)	(*)
$f_{ck} \geq 40$	general	15	20	25	30	30	35	30	35	(*)	(*)
	elementos prefabricados y láminas	15	20	25	25	25	30	25	30	(*)	(*)

(*) El proyectista fijará el recubrimiento al objeto de que se garantice adecuadamente la protección de las armaduras frente a la acción agresiva ambiental.

(**) En el caso de clases de exposición H, F ó E, el espesor del recubrimiento no se verá afectado. La clase de exposición se determina de la tabla 11.12 del capítulo de dosificación, y con mayor detalle en la tabla 8.2.2 de la EHE

Mayores detalles sobre recubrimientos recomendados se dan en el Artículo 37 de la EHE

Fuente: Referencia 8

En general, esto no conducirá a problemas serios, pero después de un largo periodo, puede causar una desintegración seria.

Pueden minimizarse los problemas que se relacionan con esta disolución mediante el uso de mezclas densas de hormigón, vaciado adecuados de las juntas de contracción y construcción, medidas para tener un drenaje satisfactorio y el suministro de recubrimientos eficaces y durables, en los casos en que resulte necesario. Los cementos puzolánicos resultan eficaces para minimizar esta disolución.

9.5 PROTECCIONES

La mejor garantía de durabilidad radica en la confección de un hormigón lo mas compacto posible, para lo cual deben emplearse masas ricas en cemento, de baja relación A/C y bien consolidadas.

TABLA 9.4. REQUISITOS PARA EL HORMIGÓN EXPUESTO A SOLUCIONES QUE CONTIENEN SULFATOS

Exposición al sulfato	Sulfatos solubles en agua (SO ₄), en % en peso	Sulfato (SO ₄) en el agua, ppm	máxima relación A/C, en peso, para hormigón con agregado de peso normal	f _c mínimo, para hormigón con agregado ligero y de peso normal, MPa *
Despreciable	0.00-0.10	0-150	-	—
Moderada	0.10-0.20	150-1500	0.50	28
Severa	0.20-2.00	1500-10000	0.45	31
Muy severa	>2.00	>10000	0.45	31

* cuando se consideren las tablas 9.4 y 9.5, se aplicara el menor valor de la máxima relación A/C, y el máximo valor de f_c

Fuente: Referencia 2

TABLA 9.5. REQUERIMIENTOS ESPECIALES PARA CONDICIONES ESPECIALES DE EXPOSICIÓN

Condición de exposición	Máxima relación agua cemento, en peso, para hormigón con agregado de peso normal	f'_c mínimo, para hormigón con agregado ligero y de peso normal, MPa *
Hormigón que debe tener una baja permeabilidad cuando este expuesto a agua	0.5	28
Hormigón expuesto a congelación y deshielo en humedad o a químicos dañinos	0.45	31
Para protección del refuerzo contra corrosión en hormigón expuesto a cloruros químicos dañinos, sal, agua salada, agua de mar, o a salpicadura de estas fuentes.	0.40	35

*cuando se consideren las tablas 9.4 y 9.5, se aplicara el menor valor de la máxima relación A/C, y el máximo valor de f'_c

Fuente: Referencia 2

9.6 EFECTO DE DIVERSAS SUSTANCIAS SOBRE EL HORMIGÓN Y LOS TRATAMIENTOS PROTECTORES CORRESPONDIENTES.

9.6.1 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Existen materiales para casi cualquier grado de protección requerida en el hormigón. El mejor material que se use en un caso dado dependerá de muchos factores, ya que pueden existir varios tratamientos para un mismo caso, pero se deberá aplicar el más adecuado a las circunstancias de aplicación, uso posterior de la estructura, etc.

En la tabla 9.6 se describen el efecto que tienen diferentes sustancias sobre el hormigón, y se indican los tratamientos más comunes. Para la mayor parte de las sustancias, se sugieren varios tratamientos, que en la mayor parte de los casos proporcionarán una protección suficiente, pero cualquiera de los tratamientos designado por un número mayor que el más grande indicado en cada celda sería igualmente adecuado y a menudo puede ser recomendable.

Para su satisfactoria aplicación, los recubrimientos protectores suelen requerir que el hormigón tenga su superficie seca y libre de polvo.

A continuación se dan las descripciones correspondientes a cada tratamiento.

1. *Fluosilicato de magnesio o fluosilicato de zinc*
2. *Silicato de sodio* (comúnmente llamado "vidrio líquido")
3. *Aceites secantes*: Se puede usar aceite de linaza, hervido o en bruto, pero el hervido se seca con mayor rapidez. También resultan eficaces los aceites de soya.
4. *Cumarona*: La cumarona es una resina sintética soluble en xilol y solventes hidrocarburos semejantes.
5. *Barnices y pinturas*: Se puede aplicar cualquier barniz al hormigón seco.
6. *Pinturas bituminosas o de alquitrán de hulla, alquitrán y breas*.
7. *Esmalte bituminoso*: Esta es una protección adecuada contra ácidos relativamente fuertes. No resiste la abrasión a altas temperaturas.
8. *Mástique bituminoso*: Este se usa principalmente para pisos en vista del espesor de la capa que debe aplicarse, pero algunos mástiques pueden aplicarse sobre superficies verticales.
9. *Ladrillo o azulejo vidriados*: Estos son productos especiales de arcilla horneada que poseen alta resistencia al ataque por ácidos o álcalis. Por supuesto, deben colocarse en mortero que también tenga resistencia a la sustancia a la que van a quedar expuestos. Suele colocarse una membrana impermeable y un lecho de mortero entre el ladrillo o azulejo y el hormigón. Se vierte una lechada de alguno de los cementos resistentes a los ácidos en las juntas.
10. *Vidrio*: Puede pegarse al hormigón.
11. *Plomo*: Puede pegarse al hormigón con una pintura asfáltica.
12. *Láminas de resina sintética, caucho y caucho sintético*: Resistentes a muchos ácidos, álcalis y otras sustancias. Estas láminas se pegan al hormigón con adhesivos especiales.

TABLA 9.6. EFECTO QUE TIENEN DIFERENTES SUSTANCIAS SOBRE EL HORMIGÓN, Y SUS RESPECTIVOS TRATAMIENTOS

	EFECTO SOBRE EL HORMIGÓN ^Ψ	Tratamiento superficial*
Ácidos		
Acético	Lo desintegra lentamente	5,6,7
Aguas acidas	Las aguas acidas naturales pueden erosionar el mortero superficial pero, por lo común, en seguida la acción se detiene	1,2,3
Carbólico	Lo desintegra lentamente	1,2,3,5
Carbónico	Lo desintegra lentamente	2,3,4
Humico	Depende del material del humus, pero puede causar la desintegración lenta	1,2,3
Clorhídrico	Lo desintegra	8,9, 10, 11, 12
Fluorhídrico	Lo desintegra	8,9, 11, 12
Láctico	Lo desintegra lentamente	3,4, 5
Muriático	Lo desintegra	8,9, 10, 11, 12
Nítrico	Lo desintegra	8,9, 10, 11, 12
Oxálico	Ninguno	Ninguno
Fosfórico	Ataca lentamente la superficie	1,2,3
Sulfúrico	Lo desintegra	8,9, 10, 11, 12
Sulfuroso	Lo desintegra	8,9, 10, 11, 12
Tínico	Lo desintegra lentamente	1,2,3

Sales y álcalis (soluciones)

Carbonatos de amonio, potasio, sodio	Ninguno	Ninguno
Cloruros de calcio, potasio, sodio, estroncio	Ninguno, a menos que el hormigón se moje y seque alternadamente con la solución, cuando es recomendable tratarlo con	1,3,4
Cloruros de amonio, cobre, hierro, magnesio, mercurio, zinc	Lo desintegra lentamente	1,3,4
Fluoruros	Ninguno, excepto el fluoruro de amonio	3,4,5
Hidróxidos de amonio, calcio, potasio, sodio	Ninguno	Ninguno
Nitratos de amonio, calcio, potasio, sodio	Lo desintegra Ninguno	8,9,10,11,12 Ninguno
Permanganato de potasio	Ninguno	Ninguno
Silicatos	Ninguno	Ninguno
Sulfatos de amonio, aluminio, calcio, cobalto, cobre, hierro, manganeso, níquel, potasio, sodio, zinc	Lo desintegra Lo desintegra; sin embargo, los productos de hormigón curados con vapor de agua a alta presión son muy resistentes a los sulfates	6, 7, 8, 9 1,3,4

* Los tratamientos indicados proporcionan protección suficiente en la mayor parte de los casos, pero cualquiera de los otros tratamientos designados por un número mayor que el más grande que se muestra sería igualmente adecuado y, a menudo, puede ser recomendable. Véase el análisis que se hace en el texto.

Ψ En general, los materiales secos no tienen efecto.

Fuente: Referencia 9

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM E119-00 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials.
2. ACI 318M-02/318RM-02(metric) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
3. ACI 201.2R-01 Guide to Durable Concrete.
4. ACI 216R-89 Guide for Determining Fire Endurance of Concrete Elements.
5. ACI 216.1-97 Standard Method for Determining the Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies.
6. ACI 224R-01 Control of Cracking in Concrete Structures.
7. ACI 224.1R-93 Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures.
8. EHE (Instrucción de Hormigón Estructural) Artículo 37, Durabilidad del Hormigón y de las Armaduras.
http://www.mfom.es/cph/norma_ehe.html.
9. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) “Manual de la Construcción con Concreto”. 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
10. NILSON A.H. (1999) “Diseño de Estructuras de Concreto”, 12ª ed, McGraw_Hill, Colombia.
11. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)
12. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association “Design and Control of Concrete Mixtures”. 14ª ed., www.portcement.org

CAPITULO 10

OTRAS PROPIEDADES

10.1. CAMBIOS DE VOLUMEN

10.1.1. EN EL HORMIGÓN FRESCO

Exudación y Contracción por fraguado.- La absorción por parte de los agregados y la exudación del agua libre hasta la parte superior, en donde se pierde por evaporación, causa contracción, que puede llegar a valores tan grandes como el 1%. Esta puede mantenerse baja: mediante el uso de agregados saturados; con un bajo contenido de cemento; diseños adecuados de las mezclas de hormigón; condiciones de vaciado húmedas y frías; y encofrado hermético y no absorbente.

Contracción Plástica.- La contracción y agrietamiento plásticos ocurren en la superficie del hormigón fresco al poco tiempo de haber sido vaciado y mientras todavía está plástico. Suelen intervenir las condiciones atmosféricas cambiantes que incrementan la relación de evaporación desde la superficie. La causa principal de este tipo de contracción es el secado rápido del hormigón en la superficie.

Se obtienen los índices más altos de evaporación cuando:

- la humedad relativa del aire es baja,
- las temperaturas del hormigón y del aire son elevadas,
- la temperatura del hormigón es mayor que la del aire
- está soplando un viento fuerte sobre la superficie del hormigón.

10.1.2. EN EL HORMIGÓN ENDURECIDO

Por la Hidratación del cemento.- Estos cambios pueden ser expansiones o contracciones, dependiendo de la importancia relativa de dos factores opuestos: La expansión del gel nuevo debida a la absorción del agua libre de los poros, o la contracción del gel debida a la extracción de agua por la reacción con el cemento restante no hidratado.

Influyen: la composición y finura del cemento (a mayor finura mayor contracción), la cantidad de agua de mezclado, las proporciones de la mezcla, las condiciones y tiempo de curado.

En general las expansiones obtenidas durante los primeros meses no sobrepasan el 0.003%, en tanto que las contracciones finales después de varios años suelen no ser mayores del 0.015%.

Por Cambios térmicos.- El hormigón no restringido¹ se expande a medida que se eleva la temperatura y se contrae cuando esta disminuye. El tipo de agregado influye mucho sobre la expansión térmica del hormigón debido a las grandes diferencias en las propiedades térmicas de los diversos tipos de agregados.

El primer agrietamiento debido a contracción por temperatura es por lo general mayor en primavera y otoño, ya que las variaciones de temperatura en 24h es mayor en esas épocas del año.

Contracción por secado.- *No existe ningún cemento que no experimente retracción.* Esta contracción es causada por el secado y la contracción del gel del cemento que se forma por la hidratación del cemento Pórtland.

Los factores que influyen en la contracción son:

1. Tipo de cemento: tienen mayor contracción los cementos más resistentes y con ganancia de resistencia más rápida.
2. A mayor finura de molido de cemento corresponde una mayor retracción.
3. La presencia de finos en el hormigón aumenta considerablemente la retracción.
4. Cantidad de agua de amasado está en relación directa con la retracción.

El hormigón armado se retrae menos que el hormigón en masa ya que las barras de acero se oponen al acortamiento.

Por otra parte, todo elemento de hormigón se encuentra sujeto a algún tipo de restricción del movimiento, ya sea por causas internas (barras de refuerzo) o externas (unión con otros elementos, fundaciones).

Debido a los cambios de volumen y a las restricciones de la estructura, se desarrollan esfuerzos de tracción en el hormigón que exceden la resistencia a la tracción o la capacidad de deformación de este, produciéndose agrietamientos en las estructuras. *La retracción no es una fuerza sino una deformación impuesta*, que provocara tensiones de tracción y, por consiguiente, fisuras, únicamente en el caso en que se encuentre impedido el libre acortamiento del hormigón; por ello, tiene tanta mas influencia cuanto mas rígida es una estructura. Este es el caso de los arcos muy rebajados y de poca luz, de hormigón en masa, en donde suelen aparecer grietas de retracción; o de las vigas de luz media o grande si están fuertemente coartadas en sus extremos.

Como valores medios del acortamiento por retracción, cuando no sea necesaria su determinación

¹ Restricciones se consideran las uniones con otros elementos, empotramientos, arriostramientos, etc.

precisa, pueden tomarse 0.35mm/m para hormigón en masa y 0.25mm/m para H^oA^o. Para una evaluación mas afinada, puede determinarse el acortamiento por retracción haciendo influir las variables que mas influyen en el fenómeno, este calculo puede encontrarse en la referencia 2, apartado 5.3.4^o

10.2. HOMOGENEIDAD

Es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen uniformemente distribuidos en la masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de esta resulten prácticamente iguales. Esto se consigue con un buen amasado y para mantenerse se requiere un transporte cuidadoso y un vaciado adecuado.

La homogeneidad puede perderse por segregación (ver apartado 6.3) o por decantación (cuando los granos gruesos se depositan en el fondo y el mortero se queda en la superficie, debido a una mezcla muy liquida). Ambos fenómenos aumentan con el contenido de agua, con el tamaño máximo de agregado, con las vibraciones o con sacudidas durante el transporte y con la puesta en obra en caída libre.

10.3. COMPACIDAD

La compacidad, íntimamente ligada a la densidad, depende de los mismos factores que esta, como son la naturaleza de áridos su granulometría y el método de comparación empleado, sobre todo este ultimo, que tienen como objeto introducir, en volumen determinado, la mayo cantidad posible de áridos y, al mismo tiempo, que los huecos dejados por estos se llenan por la pasta de cemento, eliminando por completo las burbujas de aire.

Una buena compacidad proporciona una mayor resistencia mecánica (frente a esfuerzos, impactos, vibraciones, desgastes, etc.), una mayor resistencia física (efecto de la helada) y química frente a las acciones agresivas, ya que, al contener una cantidad mínima de huecos o porosidades, las vías de penetración de los agentes exteriores son también mínimas.

10.4. PESO ESPECÍFICO

El peso específico del hormigón endurecido depende de muchos factores, como ser: naturaleza de los áridos, de su granulometría y del método de compactación empleado.

El peso especifico será mayor cuanto mayor sea el de los áridos utilizados y contenga mayor cantidad

de árido grueso y tanto mayor cuanto mejor compactado sea.

De todas formas, las variaciones de peso específico del hormigón son pequeñas, pudiendo tomarse en los cálculos el valor 2300 kg/m^3 para los hormigones en masa y 2500 kg/m^3 para los armados.

Los hormigones pesados, fabricados con áridos de Barita o metálicos tienen densidades de 3000 a 3500 kg/m^3 , empleándose en protecciones contra radiaciones.

Y los hormigones ligeros hechos de piedra pómez u otros áridos de pequeño peso específico, tienen densidades del 1300 kg/m^3 e incluso inferiores a mil.

10.5. EL HORMIGÓN Y LA TEMPERATURA

TABLA 10.1 ACCIÓN DE LAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE EL HORMIGÓN

Temperatura	Efecto sobre el Hormigón
<100°C	ninguna
100°C a 150°C	el hormigón cede su agua capilar y de adsorción
150°C durante un tiempo bastante largo	ligera disminución de la resistencia a compresión y fuerte caída de la resistencia a tracción
hasta 250°C en periodos cortos	disminución de la resistencia a tracción sin afectar a la de compresión
300°C a 500°C	perdida de un 20% de la resistencia a compresión; la de tracción puede haber desaparecido
a 500°C y mas	la cal hidratada se destruye por pérdida del agua de cristalización (agua combinada químicamente)
hacia 900°C - 1000°C	la deshidratación es total y provoca la destrucción completa del hormigón

Fuente: Referencia 2

En el capítulo 19 se estudiarán los efectos de las temperaturas extremas en el hormigón fresco y las precauciones que deben adoptarse. Ahora veremos su influencia en el hormigón endurecido.

El hormigón se comporta frente a las bajas temperaturas como si se tratase de una piedra natural, siendo su *porosidad*, así como su grado de saturación en agua, las características que determinan su comportamiento frente a una helada. En efecto, al congelarse el agua introducida en los capilares, aumenta de volumen y ejerce un efecto de cuña que fisura al hormigón, mas sobre este tema se puede encontrar en el apartado 9.3.1.

En cuanto a las altas temperaturas, el hormigón se comporta frente a ellas experimentando una serie de fenómenos físico-químicos que, en lo esencial, se resumen en la tabla 10.1.

El coeficiente de dilatación térmica, “ α ” del hormigón varía con el tipo de cemento y áridos, con la dosificación y con el rango de temperaturas; oscilando entre $9,2 \times 10^{-6}$ y 11×10^{-6} para temperaturas

comprendidas entre -15°C y 50°C . Como valor medio para los cálculos puede tomarse el de $\alpha = 9.9 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right]$, es decir, 0,01 mm por metro y grado de temperatura, aproximadamente igual al del acero. Por tanto, este valor es igualmente válido para el hormigón armado y puede aceptarse hasta una temperatura de 150°C .

Como los coeficientes de dilatación térmica de las diversas rocas que constituyen los áridos y de la pasta de cemento, no son iguales, las variaciones de temperatura provocan en la masa de hormigón movimientos térmicos diferenciales que pueden amplificar su sistema interno de microfisuras. Por ello, en los hormigones que hayan de estar sometidos a variaciones importantes de temperatura, conviene escoger los materiales componentes de forma que su compatibilidad térmica sea la mayor posible.

En el proyecto de estructuras de hormigón es necesario tener en cuenta los movimientos térmicos, bien estableciendo juntas de dilatación a distancias adecuadas (apartado 17.2.2), o bien tomando en cuenta los esfuerzos generados si la estructura no tiene libertad de movimiento.

El coeficiente de conductividad térmica del hormigón es mucho más bajo que el del acero, siendo sus valores respectivos: 1,1 y 45 kcal/m² • h • °C por término medio.

BIBLIOGRAFIA

1. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) "Manual de la Construcción con Concreto". 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
2. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". 14ª ed., Gustavo Gili, SA, Barcelona.
3. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association "Design and Control of Concrete Mixtures". 14ª ed., www.portcement.org

III

DOSIFICACIÓN

CAPITULO 11

DOSIFICACIÓN

11.1. GENERALIDADES

La dosificación de un hormigón tiene por objeto determinar las proporciones (cantidad, ya sea en peso o en volumen) en que hay que mezclar los distintos componentes del mismo, para obtener mezclas y hormigones que reúnan las características y propiedades exigidas en un proyecto. Entre estas podemos nombrar:

- Resultados económicos, no sólo respecto al costo inicial, sino durante la vida útil, hasta su servicio final,
- Trabajabilidad adecuada, para poder dar lugar a un vaciado satisfactorio en las condiciones de trabajo (con una relación agua/cemento (A/C) que sea tan baja como se pueda),
- Resistencia suficiente, para soportar las cargas de diseño
- Durabilidad, para permitir un servicio satisfactorio en las condiciones esperadas de exposición durante su vida útil.

Cada una de las anteriores requiere variaciones en la dosificación, y como consecuencia, en la mayor parte de las mezclas de hormigón, se busca un balance en las proporciones para satisfacer todas en cierta medida. Por ejemplo una excelente trabajabilidad, normalmente exige elevados contenidos de cemento, agregado fino y agua, y un bajo contenido de agregado grueso; es evidente que una mezcla de este tipo no resultaría económica y sus propiedades no serían las óptimas. Como consecuencia, a medida que se cambian las proporciones de una mezcla dada para mejorar una propiedad, deben considerarse los efectos que estos cambios generan sobre las demás, de modo que se produzca el efecto menos nocivo sobre estas.

La mejor forma de dosificar un hormigón es dando las cantidades de cada material en peso, debido a que si se hace en volumen existe la incertidumbre de no conocer cuanto volumen ocupa en realidad el material dentro del envase que lo contiene, y la susceptibilidad de la arena a sufrir grandes cambios en volumen, con un pequeño contenido de humedad, como se explico en el apartado 2.8.1.

Los datos necesarios iniciales, y con los que se debe contar para determinar las cantidades necesarias de agua, cemento y áridos disponibles para obtener el hormigón deseado al más bajo costo posible, son:

- Resistencia a una edad especificada, según el tipo de obra.
- Consistencia requerida, según de las condiciones de puesta en obra y tipo de compactación.
- Tamaño máximo del agregado grueso (según lo indicado en la tabla 2.11) y agregado económicamente disponible en obra.
- Granulometrías y módulos de finura de los agregados.

- Condiciones de exposición a la que va a estar expuesta la estructura, esto incluye el clima, nivel freático, tipo de agua, etc.

11.2. CONSIDERACIONES PARA LA PROPORCIÓN DE LOS DISTINTOS MATERIALES

Cemento.- Según sus características variara la capacidad de desarrollo de la resistencia. A mayor cantidad de cemento aumenta la resistencia pero también el calor de hidratación y los costos, por lo que este se debe mantener en un mínimo necesario así como un máximo, para lo que las normas recomiendan lo siguiente:

	EHE	ACI
<i>Cantidad máxima de cemento por metro cúbico de hormigón (kg)</i>	400	360

Agua.- La cantidad de agua debe ser solamente la necesaria para alcanzar la trabajabilidad requerida. Ya que el exceso, al evaporarse, dejara una red capilar que afectara tanto la resistencia como la durabilidad del hormigón.

Agregados.- Cuanto mayor sea el tamaño del árido, menos agua se necesitará para conseguir la consistencia deseada. Como consecuencia, podrá reducirse la cantidad de cemento. Por otra parte, tamaños superiores a 40 mm no siempre conducen a mejoras de resistencia, porque con áridos muy gruesos disminuye en exceso la superficie adherente y se crean discontinuidades importantes dentro de la masa, especialmente si ésta es rica en cemento. La limitación del tamaño máximo del agregado se da en la tabla 2.11 del capítulo de agregados.

Nota.- La forma de la partícula no necesariamente es un indicador de que el agregado estará por encima o por debajo de su capacidad de otorgar resistencia al hormigón.

La tabla 11.1 muestra, de un modo cualitativo, la influencia de algunos factores en la resistencia y la trabajabilidad, estas indicaciones son válidas dentro de límites normales.

TABLA 11.1 INFLUENCIA DE ALGUNOS FACTORES EN LA TRABAJABILIDAD Y RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

<i>Cuando aumenta...</i>	<i>La trabajabilidad</i>	<i>La resistencia</i>
<i>La finura de la arena</i>	<i>Aumenta</i>	<i>Disminuye</i>
<i>La relación grava/arena</i>	<i>Disminuye</i>	<i>Aumenta</i>
<i>La cantidad de agua</i>	<i>Aumenta</i>	<i>Disminuye</i>
<i>El tamaño máximo del árido</i>	<i>Disminuye</i>	<i>Aumenta</i>
<i>El contenido en aire</i>	<i>Aumenta</i>	<i>Disminuye</i>

Fuente: Referencia 5

11.3. MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

11.3.1. DOSIFICACIÓN CON BASE A EXPERIENCIA EN CAMPO Y/O EN MUESTRAS DE PRUEBA (ACI 318 – apartado 5.3).

Cuando se ha tenido experiencia con los materiales que van a ser utilizados y se cuenta con registros adecuados¹ de esta experiencia, o cuando se realizan dosificaciones de prueba para corroborar que la dosificación seleccionada produzca una *resistencia promedio* considerablemente más alta que la *resistencia de diseño*, se deben seguir tres pasos básicos para seleccionar una mezcla adecuada de hormigón:

1. Determinar la desviación estándar.
2. Determinar la resistencia promedio requerida.
3. Seleccionar las proporciones de la mezcla para producir esta resistencia promedio, ya sea mediante procedimientos convencionales de ensayo de probetas o mediante un registro adecuado de experiencias¹.

A continuación se desarrollan cada uno de estos para tener una mejor comprensión del método.

1. **Desviación de estándar (s).**- Cuando las instalaciones de producción de hormigón llevan registros de las pruebas, se establece una desviación estándar.

Los registros de pruebas a partir de los cuales se calcula la desviación estándar cumplirán lo siguiente:

- (a) Representarán los materiales, procedimientos de control de calidad y condiciones similares a las esperadas en obra. **El control en laboratorio no debe ser más estricto que el que se espera en obra.**
- (b) Las muestras seleccionadas tendrán resistencias de diseño entre ± 7 Mpa de la especificada para la obra propuesta.
- (c) Constarán al menos de 30 pruebas consecutivas o dos grupos de pruebas consecutivas totalizando al menos 30 pruebas, cada valor de f'_{cr} es el promedio de 2 cilindros hechos con el mismo hormigón.

La desviación estándar se determina mediante la siguiente ecuación:

$$(E\ 11.1) \quad s = \left[\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \right]^{1/2}$$

¹ Un registro adecuado se refiere a una base de datos con las proporciones que se utilizaron y las resistencias y consistencias que se obtuvieron, con los mismos materiales que se van a utilizar en la obra.

En donde:

s = desviación estándar, MPa.

X_i = pruebas individuales de resistencia, las cuales son un promedio de dos cilindros probados con el envejecimiento especificado de prueba, MPa.

\bar{X} = promedio de n resultados de pruebas de resistencia, MPa.

n = número de pruebas consecutivas de resistencia

Nótese que se utiliza la desviación estándar en MPa, en vez de coeficiente de variación en porcentaje, este último es semejante al primero expresado como porcentaje de la resistencia promedio. El coeficiente de variación, para un hormigón fabricado en central oscila entre 0.08 y 0.20, según la calidad de la planta, un coef. Mayor a 0.20 es propio de hormigones fabricados a mano o en pequeñas hormigoneras.

Cuando se tengan menos de 30 pruebas se multiplicara la desviación estándar por alguno de los factores de modificación dados en la tabla 11.2.

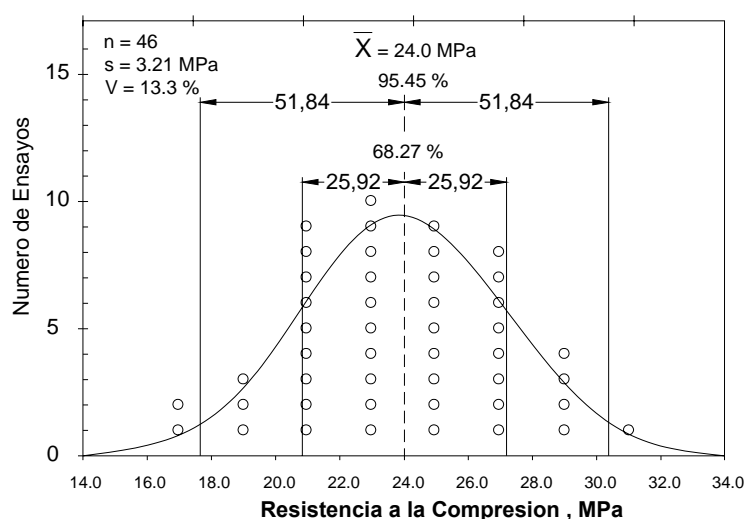


FIGURA 11.1 Distribución normal de Frecuencias de datos de resistencia tomados de 46 pruebas

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 4

TABLA 11.2 FACTOR DE MODIFICACIÓN PARA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR CUANDO SE DISPONE DE MENOS DE 30 PRUEBAS

Número de pruebas*	factor de modificación para la desviación estándar †
Menos de 15	Use la tabla 11.4
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00

* Interpolar para números intermedios de pruebas.

† Desviación estándar Modificada que se utilice para determinar la resistencia promedio requerida f'_{cr}

Fuente: Referencia 1

2. **Resistencia promedio requerida (f'_{cr} ; f_{cm}).**- El valor de la resistencia media en el laboratorio, f'_{cr} , deberá superar el valor exigido a la resistencia de proyecto, f'_c , con margen suficiente para que sea razonable esperar que, con la dispersión que introduce la ejecución en obra, la resistencia en obra sobrepase también a la de cálculo.

La resistencia a la compresión promedio requerida f'_{cr} , usada como base para la selección de las proporciones del hormigón, debe ser determinada de la tabla 11.3 usando la desviación estándar calculada anteriormente.

TABLA 11.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROMEDIO REQUERIDA, f'_{cr} , CUANDO SE TIENEN DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Resistencia especificada a la compresión, f'_c , MPa	Resistencia promedio Requerida f'_{cr} , MPa
$f'_c \leq 35$	Usar el mayor valor calculado de la E (11.2) y (11.3) (E 11.2) $f'_{cr} = f'_c + 1.34 \cdot s$ (E 11.3) $f'_{cr} = f'_c + 2.33 \cdot s - 3.45$
Más de 35	Usar el mayor valor calculado de la E (11.2) y (11.4) (E 11.2) $f'_{cr} = f'_c + 1.34 \cdot s$ (E 11.4) $f'_{cr} = 0.90 \cdot f'_c + 2.33 \cdot s$

Fuente: Referencia 1

Cuando las instalaciones de producción de hormigón no lleven registro de pruebas de resistencia en el campo, para el cálculo de la desviación estándar que cumpla con lo dicho anteriormente, la resistencia promedio requerida debe determinarse de la tabla 11.4. Se debe comprobar por medio de ensayos que la dosificación propuesta produzca una resistencia igual o mayor que f'_{cr} .

TABLA 11.4 RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN REQUERIDA CUANDO NO HAY DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR

	Resistencia especificada a la compresión, f'_c , MPa	Resistencia promedio a la compresión requerida, MPa
ACI	Menos de 21	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
	De 21 a 35	$f'_{cr} = f'_c + 8.5$
	Más de 35	$f'_{cr} = 1.10 f'_c + 5.0$
EHE	Menor a 50	$f_{cm} = f_{ck} + 8.0$

Fuente: Referencia 1

3. **Proporciones de la mezcla.**- La selección de las proporciones de la mezcla debe estar basada en documentación que consista en uno o en varios registros de pruebas de resistencia o en mezclas ensayadas en laboratorio y que den resultados satisfactorios.

El registro que se debe tener consiste en una base de datos con las proporciones que se utilizaron y las resistencias y consistencias que se obtuvieron. Los que se utilizaran son aquellas dosificaciones que hallan dado resultados semejantes a los requeridos en la obra en cuestión, obtenidos de mezclas con los mismos materiales que se van a utilizar en la obra. Generalmente si se utiliza un registro de

pruebas, tendrá que ser el mismo que se empleo para calcular la desviación estándar. Sin embargo, cuando este dé resistencias promedio mayores o menores que la resistencia promedio requerida, puede ser necesario o deseable usar proporcionamientos diferentes.

11.3.2. PROPORCIONAMIENTO SIN MEZCLAS DE PRUEBAS O SIN REGISTRO EN LA OBRA

La resistencia promedio a la compresión requerida, f'_{cr} , del hormigón elaborado con materiales similares a los propuestos a utilizarse, deberá ser por lo menos 8.5 MPa más grande que la resistencia a la compresión especificada, f'_c .

No se debe realizar dosificaciones sin mezclas de prueba en proyectos que requieran una resistencia especificada a la compresión, f'_c , mayor de 35 MPa.

11.3.3. MÉTODOS TEÓRICOS DE DOSIFICACIÓN

Existen muchos métodos y reglas para dosificar teóricamente un hormigón, pero todos son simplemente orientativos y deben ser tomados como tal. Por ello, exceptuando en obras de poca importancia, *las proporciones definitivas de los componentes deben establecerse mediante ensayos de laboratorio*, introduciendo, posteriormente en obra, las correcciones que resulten necesarias o convenientes.

Actualmente la industria del hormigón premezclado (COBOCE Hormigón, Ready Mix) se ha extendido, por lo que una buena parte de los hormigones utilizados en construcción se dosifican y elaboran en planta bajo condiciones bien controladas, con lo que se ha dado un gran paso para disponer de hormigones con las características y propiedades necesarias, contando con la garantía correspondiente de la casa suministradora.

En este texto se describirán los métodos de dosificación planteados en la ACI 211.1 (referencia 2) y en el libro Hormigón Armado (14^o edición, Jiménez M., García M., Moran C.) denominado de aquí en adelante método Jiménez Montoya (referencia 5).

11.3.3.1. Método ACI 211.1

Este procedimiento es aplicable para la selección de las proporciones de mezclas para hormigón de peso normal. Aunque los mismos datos y procedimientos básicos pueden ser utilizados para proporcionar hormigón pesado y hormigones en masa, información adicional para estos se encuentra en el ACI 211.1 Apéndice 4 y 5 respectivamente. Para calcular el proporcionamiento para hormigón ligero se debe recurrir al ACI 211.2.

La estimación de los pesos requeridos para la mezcla de hormigón implica una secuencia de 9 pasos, dados a continuación.

Se evitarán confusiones si todos los pasos se siguen, incluso si parecen repetitivos o redundantes.

Paso 1. Selección del revenimiento.- si el revenimiento no ha sido especificado, un valor apropiado para el trabajo puede ser seleccionado de la tabla 11.5.

Nota.- Los rangos de revenimiento mostrados se aplican cuando el hormigón va a ser compactado con vibradora. Las mezclas de consistencia más seca que puedan ser vaciadas eficientemente podrán ser utilizadas.

TABLA 11.5 REVENIMIENTO RECOMENDADO PARA VARIOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN

Elementos constructivos	Revenimiento [mm]	
	Máximo *	Mínimo
Fundaciones: Muros y Zapatas con refuerzo.	75	25
Fundaciones: Muros y Zapatas sin refuerzo.	75	25
Vigas y Muros reforzados.	100	25
Columnas de edificios.	100	25
Pavimentos y Losas.	75	25
Hormigón en masa.	75	25

* Se puede incrementar 25 mm para métodos de compactación diferentes al vibrado.

* El revenimiento puede aumentar cuando se utilizan aditivos.

Fuente: Referencia 2

Paso 2. Elección del tamaño máximo del agregado.- Tamaños máximos grandes, bien gradados, tienen menos vacíos que tamaños más pequeños. Por lo tanto, hormigones con agregados grandes requieren menos mortero por volumen de unidad de hormigón. Generalmente, el tamaño máximo nominal del agregado debe ser el más grande que se disponga, pero en ningún caso debe exceder los siguientes valores:

- 1/3 de la altura de losas
- 3/4 separación mínima entre armaduras
- 1/5 de la menor dimensión estructural

Estas limitaciones pueden ser obviadas si la trabajabilidad y los métodos de compactación son tales que el hormigón puede ser vaciado sin crear cangrejas ni vacíos.

En las zonas muy armadas, el ingeniero encargado de la dosificación debe seleccionar un tamaño máximo de agregado de manera que el hormigón pueda ser vaciado sin segregación excesiva ni vacíos.

Cuando se requiera hormigón de alta resistencia, mejores resultados pueden ser obtenidos con agregados de tamaño máximo menor, ya que éstos desarrollan resistencias más altas para una

cantidad de cemento dada, como se ve en la figura 7.5 del capítulo de “Resistencia y Elasticidad”.

Paso 3. Estimación de la cantidad de agua de mezclado y del contenido de aire.- La cantidad de agua por unidad de volumen de hormigón requerida para producir un revenimiento dado depende de:

- el tamaño máximo, forma de la partícula y la gradación de los agregados
- la temperatura del hormigón
- la cantidad de aire incluido (burbujas de aire atrapadas en la mezcla)
- y el uso de aditivos.

El revenimiento no es muy afectado por la cantidad de cemento (dentro de los niveles normales).

La tabla 11.6 proporciona estimaciones del requerimiento de agua de mezclado hecho con varios tamaños máximos de agregado, con y sin aire incluido. Dependiendo de la textura y forma del agregado, los requisitos de agua de mezclado pueden estar por encima o por debajo de los valores dados, pero estos valores son lo suficientemente exactos para una primera estimación.

Nota.- Cuando se utilizan volúmenes significativos de aditivos líquidos, estos se deben considerar como parte del agua de mezclado.

Tipos de exposición:

Exposición suave.- Cuando se incluye aire para dar un efecto benéfico, que no sea la durabilidad, por ejemplo mejorar la trabajabilidad o cohesión o en hormigón con un bajo contenido de cemento para mejorar la resistencia, contenidos de aire más bajos que aquellos necesarios para la durabilidad pueden ser utilizados. Esta exposición incluye elementos interiores o al aire libre en un clima donde el hormigón no estará expuesto a congelación o a agentes descongelantes.

Exposición moderada.- Cuando la estructura está situada en un clima donde se espera congelación pero donde el hormigón no estará continuamente expuesto a humedad o agua libre por períodos largos antes de la congelación y no estará expuesto a agentes descongelantes u otros productos químicos agresivos. Por ejemplo: vigas exteriores, columnas, muros, vigas principales o losas que no están en contacto con el suelo húmedo y están en una posición en la cual no recibirán directamente sales de descongelación.

Exposición severa.- Hormigón que está expuesto a productos químicos descongelantes u otros agentes agresivos o donde el hormigón pueda llegar a estar altamente saturado por el contacto continuo con humedad o agua libre antes de congelarse. Por ejemplo: pavimentos, losas de puente, bordillos, cunetas, aceras, revestimiento de canales o tanques de agua exteriores.

TABLA 11.6 REQUERIMIENTOS DE AGUA DE MEZCLADO Y AIRE INCLUIDO PARA DIFERENTES REVENIMIENTOS Y TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO

	Agua, Kg/m ³ de hormigón según el tamaño máximo de agregado							
	9.5mm* (3/8")	12.5mm* (1/2")	19mm* (3/4")	25mm* (1")	37.5mm* (1 1/2")	50mm ^{†*} (2")	75mm [†] (3")	150mm [†] (6")
Revenimiento, mm	Hormigón sin aire incluido							
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire, en hormigón sin aire incluido [%]	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
	Hormigón con aire incluido							
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
	Contenido promedio de aire en porcentaje según el nivel de exposición							
Exposición Suave	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5 ^{††}	1.0 ^{††}
Exposición Moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5 ^{††}	3.0 ^{††}
Expo. Severa^{‡‡}	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5 ^{††}	4.0 ^{††}

* Las cantidades de agua de mezclado que se dan para los hormigones con aire incluido, están basadas en requisitos totales típicos de contenido de aire, como se indica para la "exposición moderada" en esta tabla. Estas cantidades de agua de mezclado son para usarse en el cálculo de los contenidos de cemento para cargas de prueba. Son máximas para agregados angulares que tengan gradaciones aceptables dentro de las especificaciones de la ASTM. Los agregados bien redondeados requerirán aproximadamente 18kg menos de agua para el hormigón con aire incluido. Los aditivos reductores de las cantidades de agua reducirán los requisitos de agua de mezclado en un 5% o más.

† Los valores de revenimiento para hormigón que contiene agregados mayores a 37.5mm (1 1/2") están basados en ensayos de revenimiento después de remover las partículas mayores a 37.5mm (1 1/2") por tamizado.

†† Cuando se usen agregados grandes en hormigones con bajo contenido de cemento, el aire incluido no debe ser dañino a la resistencia. En la mayoría de los casos los requerimientos de agua de mezclado se reducen lo suficiente para mejorar la relación agua cemento y de esa forma compensar el efecto de reducción de resistencia del aire incluido. Generalmente por este motivo para estos agregados grandes los contenidos de aire recomendados para exposiciones extremas deben ser considerados aunque no exista exposición a la humedad ni congelación.

‡‡ Estos valores se basan en la premisa de que se requiere 9% de aire en el mortero de hormigón.

Fuente: Referencia 2

Paso 4. Selección de la relación agua-cemento.- La relación A/C requerida es determinada no solamente por requisitos de resistencia si no también por factores tales como la durabilidad. Dado que diversos agregados y cementos producen diferentes resistencias para la misma relación A/C, es muy conveniente tener o desarrollar la relación entre la resistencia y la relación A/C para los materiales a ser utilizado, como se describe en el apartado 11.3.4. En ausencia de tales datos, valores aproximados y relativamente conservadores para el cemento Pórtland tipo I, se pueden tomar de la tabla 11.7. Si el valor requerido de resistencia no se encuentra en la tabla se debe Interpolar para encontrar la relación A/C requerida.

TABLA 11.7 RELACIONES ENTRE LA RELACIÓN A/C Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

Resistencia a la compresión a los 28 días, MPa	Relación A/C, por peso	
	Hormigón sin aire incluido*	Hormigón con aire incluido**
40	0.42	-
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.79	0.70

* Los valores se estimaron para hormigón con un contenido de aire menor al 2%.

** Los valores se estimaron para hormigón con un contenido de aire menor al 6%.

Fuente: Referencia 2

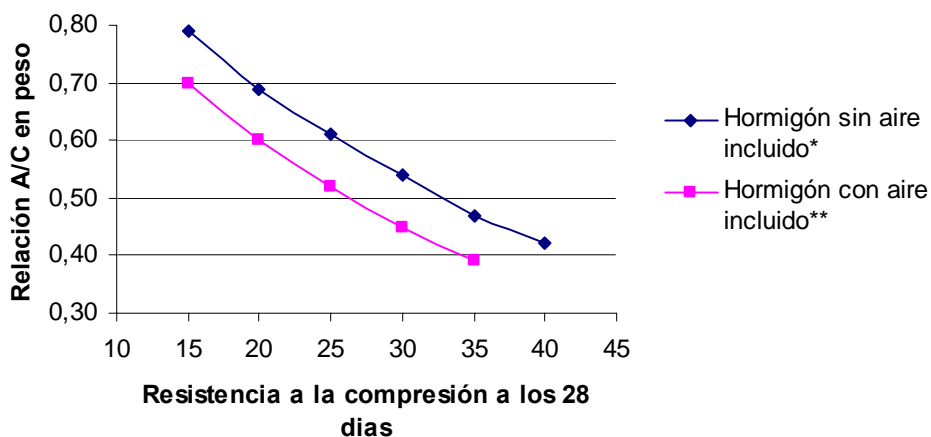


FIGURA 11.2 Relaciones entre la relación a/c y la resistencia a la compresión del hormigón.

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 11.8 CANTIDAD MÁXIMA DE LA RELACIÓN AGUA CEMENTO PARA HORMIGÓN SOMETIDO A EXPOSICIÓN SEVERA

Tipo de estructura	Estructuras húmedas expuestas continua o frecuentemente a congelación y deshielo.	Estructura expuesta a agua de mar o sulfatos
Secciones delgadas (postes, cunetas, botaguas, trabajos ornamentales, etc.) y secciones con menos de 25mm de recubrimiento para el acero.	0.45	0.40
Todas las demás estructuras	0.50	0.45

Fuente: Referencia 2

En caso de que la obra vaya a encontrarse en una situación de exposición severa la relación A/C se saca de la tabla 11.8, esta se compara con el valor obtenido de la tabla 11.7 y se adopta el menor.

Cuando materiales puzolánicos se utilizan en el hormigón, se asume que $\frac{A}{(C+P)} = \frac{A}{C}$, aunque, en realidad, el volumen absoluto total de cemento más los materiales puzolánicos normalmente será levemente mayor.

Paso 5. Cálculo de la cantidad del cemento.- La cantidad de cemento por unidad de volumen de hormigón está fijada por lo determinado en los pasos 3 y 4. La cantidad requerida de cemento es igual al contenido estimado de agua de mezclado (paso 3) dividido por la relación A/C (paso 4)

Si las especificaciones incluyen un límite mínimo de cemento además de los requisitos para la resistencia y la durabilidad, en la mezcla se usará el que sea mayor.

Nota.- El uso de aditivos o materiales puzolánicos afectarán las propiedades del hormigón fresco y endurecido.

Paso 6. Estimación de la cantidad de agregado grueso.- En la tabla 11.9 se da el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón. Se observa que este volumen solamente depende de su tamaño máximo y el modulo de finura del agregado fino. Las Diferencias en la cantidad de mortero requerido con diferentes agregados, debido a las diferencias en la forma de la partícula y gradación, se compensan automáticamente por diferencias en el contenido de vacío en varillado seco.

El peso seco de agregado grueso requerido para 1m³ de hormigón es igual al valor de la tabla 11.9 multiplicado por el peso unitario (varillado seco) del agregado en kg/m³.

Para un hormigón más trabajable, requerido cuando la colocación es por bombeo o cuando el hormigón se debe vaciar una zona muy armada, se puede reducir el contenido de agregado grueso que se determinó con la tabla 11.9 hasta un 10%. Sin embargo, se debe hacer con precaución ya que el revenimiento resultante, la relación A/C y la resistencia del hormigón sean consistentes con las recomendaciones del paso 1 y paso 4 y que cumplan con las especificaciones del proyecto.

Paso 7. Estimación del contenido del agregado fino.- Hasta el paso 6 todos los ingredientes del hormigón se han determinado, excepto el agregado fino, la cantidad de este será lo que falta para completar 1m³ de hormigón. Existen dos procedimientos: el método por peso y el método por volumen absoluto.

Método por peso.- Cuando el peso del hormigón por unidad de volumen se asume o se estima por experiencia, el peso requerido de agregado fino es simplemente la diferencia entre el peso del hormigón fresco y el peso total de los otros ingredientes. A menudo el peso unitario del hormigón es conocido con razonable exactitud de experiencias anteriores con los materiales. En ausencia de tal

información, la tabla 11.10 se puede utilizar para hacer una primera estimación. Incluso si la estimación del peso de hormigón por m^3 es grosera, las proporciones de la mezcla serán lo bastante acertadas para permitir un ajuste en base a las mezclas de prueba, como se demostrará en los ejemplos.

Si se cuenta con la información necesaria, se puede afinar el peso estimado, en la tabla 11.10, del modo siguiente:

- Por cada 5 kg en el agua de mezclado que se aumente o disminuya (en la dosificación final), según los valores de la tabla 11.6 para un revenimiento de 75 a 100 mm, corrija el peso del hormigón (tabla 11.10) en 8 kg por m^3 en la dirección opuesta (si se aumenta agua, entonces se disminuye el peso del hormigón, y viceversa).
- Por cada 20 kg de diferencia en el contenido de cemento respecto de 330 kg, corrija el peso del hormigón en 3 kg/m^3 en la misma dirección (si se aumenta la cantidad de cemento, entonces se aumentará el peso del hormigón, y viceversa).
- Por cada 0.1 que se desvíe la gravedad específica del agregado respecto a 2.7, corrija el peso del hormigón en 60 kg en la misma dirección.
- En el caso de hormigón con aire incluido, se puede incrementar el peso en 1% por cada 1% de reducción en el contenido de aire respecto a la cantidad dada en la tabla 11.6.

Si se desea un cálculo teóricamente exacto del peso por m^3 de hormigón fresco, la siguiente fórmula puede ser utilizada:

$$(E\ 11.5) \quad U_M = 10 \cdot G_a (100 - A) + C_M \left(1 - \frac{G_a}{G_c} \right) - W_M (G_a - 1)$$

Donde:

U_M = Masa unitaria del hormigón fresco, Kg/m^3

G_a = Gravedad específica de agregado grueso y fino combinados.

G_c = Gravedad específica del cemento (por lo general 3.15 en cementos estándar y entre 2.85 y 3 para cementos puzolánicos)

A = Contenido de aire en porcentaje

W_M = Agua de mezclado requerida, Kg/m^3

C_M = Cemento requerido, Kg/m^3

TABLA 11.9 VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO POR UNIDAD DE VOLUMEN DE HORMIGÓN

Tamaño máximo de agregado en mm	Volumen varillado seco de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena *			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

* Estos volúmenes se seleccionaron por relaciones empíricas para producir hormigón con un grado de trabajabilidad adecuado para construcciones con hormigón reforzado. Para un hormigón menos trabajable, como el requerido para la construcción de pavimento de hormigón, pueden aumentar en alrededor del 10 %. Para un hormigón mas trabajable, como puede requerirse a veces cuando el vaciado va a ser por bombeo, o cuando debe trabajarse el hormigón en elementos muy armados, puede reducirse hasta en un 10%.

Fuente: Referencia 2

TABLA 11.10 PRIMERA ESTIMACIÓN DEL PESO DEL HORMIGÓN FRESCO

Tamaño máximo de agregado en mm	Primera estimación del peso del hormigón, kg/m ³ *	
	Hormigón sin aire incluido*	Hormigón con aire incluido**
9.5	2280	2200
12.5	2310	2230
19	2345	2275
25	2380	2290
37.5	2410	2350
50	2445	2345
75	2490	2405
150	2530	2435

* Valores calculados por la E (11.5) para hormigón de riqueza media (330 kg de cemento por m³) y revenimiento mediano, con agregado de gravedad específica de 2.7. Los requisitos de agua corresponden a un revenimiento de 75 a 100 mm de la tabla 2.

** Para hormigón con aire incluido, se uso el contenido de aire para exposición severa de la tabla 2

Fuente: Referencia 2

Método por Volumen Absoluto.- Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregado fino implica el uso de volúmenes desplazados por los ingredientes. En este caso, el volumen total desplazado por los ingredientes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se quitan del volumen unitario del hormigón para obtener el volumen requerido de agregado fino.

El volumen ocupado en el hormigón por cualquier ingrediente es igual a su peso dividido por su densidad (densidad = peso unitario del agua × gravedad específica del material).

Paso 8. Ajustes por Humedad del Agregado.- Las cantidades de agregado que realmente se pesarán para el hormigón, deben considerar la humedad de estos. En obra, generalmente, los agregados estarán húmedos y su peso seco debe ser incrementado en el porcentaje de agua, absorbida y superficial, que contengan. El agua de mezclado añadida a la mezcla se debe reducir en una cantidad igual a la humedad superficial (humedad total menos absorción) contribuida por el agregado.

En algunos casos, puede ser que el agregado añadido este seco. En este caso si la absorción (apartado 2.5.4) es mayor que el 1%, y la estructura de poros del agregado es tal que una fracción significativa de absorción ocurre antes del vaciado, podría haber un aumento notorio en el índice de pérdida de revenimiento debido a una disminución del agua de mezclado. También, la relación A/C efectiva podría verse reducida por el agua absorbida por el agregado antes de su colocación inicial.

Nota.- Este paso solo puede ser realizado antes de preparar la mezcla y si se conocen la absorción y la humedad actual de los agregados en el momento de la dosificación, ya sea en obra o en laboratorio.

Paso 9. Ajustes de la mezcla de prueba.- Las proporciones calculadas para la mezcla se deben comprobar por medio de ensayos de prueba preparados y realizados de acuerdo con la NB 586; ASTM C192, y siguiendo las siguientes recomendaciones:

- Solamente debe usarse la cantidad necesaria de agua para producir el revenimiento requerido, sin importar la cantidad asumida en la selección de las proporciones de prueba.
- Se debe comprobar el peso unitario y el volumen del hormigón (NB 608; ASTM C 138)
- Se debe comprobar el contenido de aire (ASTM C138, C173, o C231).
- Se debe observar que se obtenga una trabajabilidad apropiada, sin segregación y buenas características de acabado.

Se deben hacer ajustes necesarios en las proporciones para las siguientes mezclas de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Si el revenimiento de la mezcla de prueba no es el correcto, aumentar o disminuir la cantidad de agua estimada en 2 Kg/m^3 por cada 10mm de revenimiento deseado.
2. Si el contenido de aire deseado (para hormigón con aire incluido) no fue alcanzado, se debe re-estimar el contenido de aditivo requerido para un apropiado contenido de aire y reducir o incrementar el contenido de agua de mezclado del punto anterior en 3 Kg/m^3 por cada 1% de aire que se aumento o disminuyo respecto a la mezcla de prueba.
3. Si la dosificación esta basada en el peso estimado por m^3 de hormigón fresco, la nueva estimación de este peso, para ajustar las proporciones de la mezcla de prueba, será igual al peso unitario del hormigón en kg/m^3 medida en la mezcla de prueba, reducida o incrementada

por el porcentaje de incremento o disminución en el contenido de aire entre el primer tanteo y este.

4. Calcular los nuevos pesos de la mezcla, comenzando en el *Paso 4*, modificando el volumen del agregado grueso (tabla 11.9), si es que fuera necesario, para proporcionar una trabajabilidad apropiada.

Ejemplo 1.- A Continuación se desarrollara un ejemplo para una mejor comprensión del método ACI 211.1:

Para la fundación de un puente se requiere un hormigón que estará expuesto a agua dulce en un clima severo. Se requiere que el hormigón tenga una resistencia f'_{cr} de 21MPa a los 28 días. Las condiciones dadas de puesta en obra permiten un revenimiento de 25 a 50mm (consistencia plástica, consolidación por vibrado) y el uso de agregados grandes, pero el único agregado grueso, económicamente disponible, de calidad satisfactoria tiene un tamaño máximo de 25mm (1"), proviene de un río cercano, y este será utilizado.

Según ensayos de laboratorio, sobre el agregado, se obtuvieron los siguientes resultados:

	ARENA	GRAVA
Modulo de finura	2.8	7.32
Peso Unitario Varillado (kg/m^3)	-	1522
Gravedad Específica	2.64	2.68
% Absorción	0.7	0.5

Se utilizara cemento Tipo I con una gravedad específica de 3.15.

A continuación se calcularán los materiales por m^3 de hormigón:

Paso 1.- Revenimiento de 25 a 50mm.

Paso 2.- El agregado tiene una gradación de 25mm (1") a 4.75mm (tamiz N°4) (ver tabla 2.9).

Paso 3.- Se usará hormigón sin aire incluido. De la tabla 11.6 se obtiene que la cantidad aproximada de agua de mezclado para producir un revenimiento de de 25 a 50mm, para un hormigón con aire incluido y un agregado con un tamaño máximo de 25mm, es 179Kg/ m^3 .

Paso 4.- De la tabla 11.7, se obtiene que la relación A/C necesaria para producir una resistencia de 21MPa, para un hormigón sin aire incluido, mediante la interpolación entre los datos conocidos es:

$$(E\ 11.6) \quad A/C_{requerido} = \frac{(f'_{cr} - f'_{cr\ superior}) \cdot (A/C_{superior} - A/C_{inferior})}{f'_{cr\ superior} - f'_{cr\ inferior}} + A/C_{superior}$$

$$A/C_{21MPa} = \frac{(21 - 25) \cdot (0.61 - 0.69)}{25 - 20} + 0.61 = 0.67$$

Paso 5.- De la información obtenida en los pasos 3 y 4, el contenido requerido de cemento, despejando de la relación A/C, será:

$$\frac{179 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]}{0.67} = 267 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Paso 6.- La cantidad de agregado grueso es obtenida de la tabla 11.9. Para un agregado fino con un modulo de finura de 2.8 y un tamaño máximo de agregado de 25mm, la tabla indica 0.67m³ de volumen varillado seco de agregado grueso, para ser usado en cada m³ de hormigón. Por tanto el peso seco requerido de agregado grueso es:

$$0.67 \left[\text{m}^3 \right] \times 1522 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] = 1020 \text{ Kg}$$

Paso 7.- Con las cantidades de agua, cemento y agregado grueso establecidas, el material restante para completar 1m³ de hormigón será agregado fino y aire. El requerimiento del agregado fino puede ser determinado bajo el concepto de peso o volumen absoluto como se mostrará a continuación:

Por Peso.- De la tabla 11.10 se asume que el peso de 1m³ de hormigón con aire incluido, hecho con agregado con un tamaño máximo de 25mm es 2380Kg (Para un primer tanteo, la exactitud de este valor no es relevante).

Pesos que ya son conocidos:

Agua de Mezclado	179 Kg
Cemento	267 Kg
Agregado grueso	1020 Kg
parcial	1466 Kg
agregado fino = 2380 - 1466	= 914 Kg

Por Volumen Absoluto.- Con las cantidades de cemento, agua, aire y agregado grueso ya establecidas, el contenido de agregado fino será la diferencia de 1m³ de hormigón menos el volumen ocupado por el resto de los componentes, como se muestra a continuación:

Material	Gravedad Específica, G_s	Densidad (ρ) [Kg/m ³]	Peso calculado de los Materiales [Kg]	Volumen Peso Mat./ ρ [m ³]
Agua	1	1000	179	0.179
Cemento	3.15	$G_s \times \gamma_w = 3150$	267	0.085
Agregado Grueso	2.68	$G_s \times \gamma_w = 2680$	1020	0.381
Volumen Total de ingredientes, sin el agregado fino				0.645
Volumen de Agregado Fino				$1 - 0.645 = \underline{\underline{0.355}}$
Agregado Fino	2.64	$G_s \times \gamma_w = 2640$	$0.355 \times 2640 = \underline{\underline{937}}$	

G_s = Gravedad específica de cada material.

γ_w = Peso específico del agua.

El resumen de cantidades de cada material por m³ de hormigón es:

Materiales	Peso [Kg]
Agua de mezclado	179
Cemento	267
Agregado Grueso seco	1020
Arena seca:	
Calculada por peso	914
Calculada por volumen	937

Para continuar con el ejemplo se tomara el valor de arena calculado por peso.

Paso 8.- Ensayos indican que el agregado grueso, al momento del mezclado, tiene una humedad del 3% y el agregado fino del 5%. Entonces se deben realizar los ajustes correspondientes tanto en los agregados como en el agua de mezclado.

Ajuste en el peso de los agregados:

El peso ajustado será el peso del agregado seco más el peso de agua:

$$\text{Agregado grueso húmedo} = 1020 (1+0.03) = 1051 \text{ [Kg]}$$

$$\text{Agregado fino húmedo} = 914 (1+0.05) = 960 \text{ [Kg]}$$

Ajuste en el peso del agua de mezclado:

El agua absorbida por los agregados no se convierte en parte del agua de mezclado y no debe considerarse en los ajustes, por lo tanto solo se considera el agua superficial que será el porcentaje de humedad menos el porcentaje de agua absorbida:

$$\text{Agregado grueso} \quad 3 - 0.5 = 2.5\%;$$

$$\text{Agregado fino} \quad 5 - 0.7 = 4.3\%.$$

El agua que se añadirá a la mezcla será:

$$\text{Agua calculada} \quad - \quad \text{Agua aportada por los agregados}$$

$$179 \quad - \quad [1020 \cdot (0.025) + 914 \cdot (0.043)] \quad = 114 \text{ Kg}$$

Paso 9, Ajustes de la mezcla de prueba.- Para las pruebas en laboratorio se considera que se necesitaran 0.02m^3 de hormigón. para lo que se reducen en proporción las cantidades requeridas de cada material.

Calculo de proporciones en base al peso.-

Materiales	Peso
Agua de mezclado*	1.8*
Cemento	5.34
Agregado Grueso húmedo	21.02
Arena húmeda	19.2
TOTAL	47.36

* Aunque el agua calculada era de 2.28, sólo se necesito 1.8 para obtener el revenimiento requerido.

Observaciones de laboratorio:

- Revenimiento de 40 mm, se calculo un peso unitario de 2271 kg/m^3
- Se observo que la mezcla contenía más arena de la necesaria para producir la trabajabilidad adecuada y condiciones de acabado satisfactorias.

Para dar un volumen apropiado y otras características para mezclas futuras, se realizan los siguientes ajustes:

Dado que el volumen de la muestra de prueba fue:

$$\frac{47.36[\text{kg}]}{2271\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]} = 0.0208[\text{m}^3]$$

y el contenido en agua de mezclado fue 1.80 (añadida) + 0.51 (en el agregado grueso) + 0.786 (en el agregado fino) = 3.096 kg, entonces la cantidad de agua de mezclado requerida para 1m^3 de hormigón con el mismo revenimiento debe ser:

$$\frac{3.096[\text{kg}]}{0.0208[\text{m}^3]} = 149[\text{kg}] \text{ de agua por } \text{m}^3 \text{ de hormigón}$$

El resumen de cantidades (ajustada) de cada material por m^3 de hormigón es:

Materiales	Peso [Kg]
Agua de mezclado	149
Cemento	267
Agregado Grueso húmedo	1051
Arena húmeda	960
TOTAL	2392

11.3.3.2. Método Jiménez Montoya, basado en la EHE

- 1) El 1^{er} paso es escoger la relación A/C, en base a los materiales que se van a utilizar y la resistencia de diseño. La tabla 11.11 incluye valores orientativos máximos de la relación A/C, en función de la resistencia del H^o, del tipo de árido y de la clase de cemento, para unas condiciones de ejecución buenas. Las Normas europeas, recomiendan limitar la relación A/C y el contenido en cemento a los valores indicados en la tabla 11.12, con objeto de proteger al H^o frente a las acciones físicas y al ataque químico, así como para evitar la corrosión de las armaduras.

TABLA 11.11 VALORES ORIENTATIVOS MÁXIMOS DE LA RELACIÓN A/C EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A COMPRESIÓN A 28 DÍAS

Resistencia del hormigón (MPa)		Áridos rodados (*)		Áridos machacados (*)	
característica f_{ck}	media f_{cm} †	CEM-I/32.5 ‡	CEM-I/42.5 §	CEM-I/32.5 ‡	CEM-I/42.5 §
20	28	0,55	0,60	0,65	
25	33	0,50	0,55	0,60	0,65
30	39	0,45	0,50	0,55	0,60
35	44	0,40	0,45	0,50	0,55
40	50	-	0,40	0,45	0,50

* Hormigones sin aditivos

† Valor obtenido con la relación de la tabla 11.4

§ Se pueden tomar estos valores para los cementos Tipo I-30, producidos en nuestro medio

‡ Se pueden tomar estos valores para los cementos Tipo I-40, producidos en nuestro medio

Fuente: Referencia 5

TABLA 11.12 MÁXIMA RELACIÓN A/C Y MÍNIMO CONTENIDO DE CEMENTO EN KG/M³ EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Condiciones ambientales de la estructura		Máxima relación agua/cemento.	Contenido mínimo de cemento.	
			H. en masa	H. armado
- Interior de edificios - Exterior con baja humedad	I	0,65	200	250
- Interior de edificios con humedad alta - Exteriores normales - Elementos en contacto con aguas normales - Elementos en contacto con terrenos ordinarios.	II sin heladas	0,60	200	275
	II-h con heladas	0,55		300
	II-f con heladas y fundentes	0,50		300
- Elementos en atmósfera industrial agresiva - Elementos en atmósfera marina - Elementos en contacto con aguas salinas o ligeramente ácidas.	III* sin heladas	0,55	200	300
	III-h* con heladas	0,50		300
	III-f* con heladas y fundentes ⁽¹⁾	0,50		325
- Ambientes con contenido de sustancias químicas capaces de provocar alteraciones del hormigón con velocidad...	IV-a* ... lenta	0,50	225	325
	IV-b* ... media	0,50	250	350
	IV-c* ... alta	0,45	250	350

⁽¹⁾ Con fundentes (sales de deshielo), el hormigón debe contener un mínimo de 4,5% de aire ocluido

* hormigones sometidos a los ambientes III y IV, deben comprobarse la impermeabilidad

Fuente: Referencia 3

2) Selección del árido a ser utilizado

Tamaño Máximo Del Árido.- Según la EHE el árido utilizado no de ser mayor que:

- 0,8 de la distancia horizontal libre entre vainas o armaduras que no formen grupo, o entre un borde de la pieza y una vaina o armadura que forme un ángulo mayor que 45° con la dirección de hormigonado.
- 1,25 de la distancia entre un borde de la pieza y una vaina o armadura que forme un ángulo no mayor que 45° con la dirección de hormigonado.
- 0,25 de la dimensión mínima de la pieza, excepto en los casos siguientes:
 - Losa superior de los forjados, donde el tamaño máximo del árido será menor que 0,4 veces el espesor mínimo.
 - Piezas de ejecución muy cuidada (caso de prefabricación en taller) y aquellos elementos en los que el efecto pared del encofrado sea reducido (forjados que se encofran por una sola cara), en cuyo caso será menor que 0,33 veces el espesor mínimo.

Composición granulométrica de los áridos.- Este método propone la utilización de la curvas de Fuller y Bolomey (apartado 2.5.5.2), para la granulometría del árido total, observando las que se aproximan a la gradación de máxima densidad y mínimo contenido de vacíos.

No es necesario ceñirse exactamente a las curvas teóricas de Fuller o Bolomey, basta con que el módulo de finura de la curva compuesta sea el mismo que el de la teórica. Esto es válido también, según Hummel y Abrams, para el caso de granulometría discontinua.

El módulo de finura correspondiente a la parábola de Fuller se muestra, en la tabla 11.13, en función del tamaño máximo del árido. De una forma más ajustada y considerando, además, la variable “contenido de cemento”, pueden utilizarse los valores del módulo de finura recomendados por Abrams, los cuales figuran en la tabla 11.14.

TABLA 11.13 MÓDULO DE FINURA DE ÁRIDOS QUE SIGUEN LA PARÁBOLA DE FULLER

Tamaño máximo del árido en mm	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Módulo de finura	5,21	5,45	5,64	5,82	6,00	6,16	6,29	6,40	6,51	6,60

Fuente: Referencia 5

TABLA 11.14 VALORES ÓPTIMOS DEL MÓDULO DE FINURA SEGÚN ABRAMS PARA HORMIGONES ORDINARIOS

Contenido en cemento (kg/m ³)	Tamaño máximo del árido (mm)						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4,05	4,45	4,85	5,25	5,60	5,80	6,00
300	4,20	4,60	5,00	5,40	5,65	5,85	6,20
350	4,30	4,70	5,10	5,50	5,73	5,88	6,30
400	4,40	4,80	5,20	5,60	5,80	5,90	6,40

Fuente: Referencia 5

Una vez elegido el módulo de finura teórico con el que se desea trabajar, es sencillo determinar las proporciones en que deben mezclarse los áridos, a partir de sus módulos de finura propios. Si, como

ocurre corrientemente, se dispone de arena y grava cuyos módulos de finura son MF_A y MF_G , y siendo MF_{AT} el modulo de finura del árido total teórico elegido, se deducen los porcentajes P_A y P_G , en peso, en que deben mezclarse la arena y la grava, resolviendo las ecuaciones:

$$(E\ 11.7) \quad \begin{cases} MF_{arido_total} = \frac{MF_A * P_A}{100} + \frac{MF_G * P_G}{100} \\ P_A + P_G = 100 \end{cases}$$

Entonces, el porcentaje de P_A será:

$$(E\ 11.8) \quad P_A = \frac{MF_{mezcla} - MF_G}{MF_A - MF_G} * 100$$

- 3) **Consistencia y cantidad de agua.**- Luego, tomando en cuenta la forma de compactación, se fija la consistencia, y se determina la cantidad de agua por metro cúbico de hormigón, según los valores de la tabla 11.15.

TABLA 11.15 LITROS DE AGUA POR METRO CÚBICO*

Consistencia del hormigón.	Forma de compactación	Asentamiento en el cono de Abrams (cm)	Áridos rodados			Piedra partida y arena de machaqueo		
			80mm	40 mm	20 mm	80 mm	40 mm	20 mm
Seca	Vibrado enérgico en taller	0-2	135	155	175	155	175	195
Plástica	Vibrado enérgico en obra	3-5	150	170	190	170	190	210
Blanda	Vibrado o apisonado	6-9	165	185	205	185	205	225
Fluida	Picado con barra	10-15	180	200	220	200	220	240

* Hormigones sin aditivos

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 5

- 4) **Cantidad de cemento.**- Una vez fijada la cantidad de agua y conocida la relación A/C se determina la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón. Dicho contenido no debe ser inferior a los valores indicados en la tabla 11.12, ni superior a 400 kg salvo casos especiales. Esta última limitación es orientativa y tiene por objeto evitar valores altos del calor de hidratación y de retracción en las primeras edades, factores que dependen de la temperatura ambiente, clase y finura del cemento, etc.
- 5) **Proporciones de la mezcla.**- A la hora de determinar las cantidades necesarias de los distintos materiales para obtener un metro cúbico de hormigón, este método considera que la contracción que experimenta el hormigón fresco, puede tomarse como 2,5%, debido a que el agua se evapora en una parte; en otra parte es absorbida por el árido; y el resto, forma con el cemento una pasta que se retrae apreciablemente antes de fraguar.

Por tanto, la suma de los volúmenes de los distintos materiales debe ser $1,025\ m^3$, para obtener un metro cúbico de hormigón:

$$(E\ 11.9) \quad A + \frac{C}{p_c} + \frac{G_1}{p_1} + \frac{G_2}{p_2} = 1,025 \text{ m}^3$$

En donde $A[m^3]$, $C[kg]$, $G_1[kg]$ y $G_2[kg]$, son las cantidades calculadas de agua, cemento, arena y grava, respectivamente, por metro cúbico de hormigón y p_c , p_1 y p_2 , sus respectivas densidades.

La densidad debe determinarse directamente. A falta de estos datos pueden adoptarse los valores $p_c = 3150$; $p_1 = p_2 = 2650 \text{ kg/m}^3$ (la densidad del agregado es igual a la gravedad específica G_s multiplicada por la densidad del agua, esta última igual a 1000 kg/m^3)

La relación entre G_1 y G_2 se determina a partir de la curva granulométrica adoptada para el árido total, o bien, mediante el método del módulo de finura. En la tabla 11.16 se dan unos valores orientativos de la relación G_2/G_1 , para distintos tipos de áridos y consistencias, que pueden ser de utilidad, bien para tanteos, o bien para dosificar hormigones para obras de poca importancia.

TABLA 11.16 VALORES DE LA RELACIÓN GRAVA/ARENA G_2/G_1

	G_2 y G_1 rodadas	G_2 machacada y G_1 rodada	G_2 y G_1 machacadas
Hormigón muy plástico, rico en mortero.	1,5 a 1,7	1,4 a 1,6	1,3 a 1,5
Hormigón normal.	1,8 a 2,0	1,7 a 1,9	1,6 a 1,8
Hormigón compacto, más bien seco.	2,0 a 2,2	1,9 a 2,1	1,8 a 2,0

Fuente: Referencia 5

En todo lo dicho se ha supuesto que los áridos están secos. Si no es así, hay que determinar su contenido de agua y restar el que corresponda a los pesos G_1 y G_2 de la cantidad "A" de agua que se vierte directamente en la hormigonera. Este efecto, que puede ser muy importante en el caso de la arena, invalida prácticamente los métodos de dosificación por volumen, con los que pueden cometerse errores apreciables (ver apartado 2.8.1).

Finalmente, en la tabla 11.10, al igual que el método del ACI, se dan unos valores estimativos de la masa específica del hormigón fresco, en función del tamaño máximo del árido, que pueden ser muy útiles para valorar las proporciones de las mezclas.

6) **Correcciones y ensayos.**- Una vez establecidas las proporciones de la mezcla, deben efectuarse ensayos en laboratorio para comprobar que se obtienen las características deseadas, de resistencia y trabajabilidad, introduciendo las correcciones necesarias.

A la vista de los resultados de los ensayos (asentamiento en el cono de Abrams, peso unitario del hormigón y resistencia) se retocarán las dosis de los distintos componentes, teniendo en cuenta las siguientes observaciones:

- Con áridos de machaqueo conviene aumentar algo el árido fino.
- Para hormigón vibrado, puede aumentarse algo el árido grueso.
- Con dosis de cemento superiores a los 300 kg/m^3 puede disminuirse algo el árido fino, y al contrario con dosis inferiores.
- Con cemento puzolánico debe aumentarse algo la dosis de agua.
- En hormigones con aire incluido, debe disminuirse la arena en un volumen igual al del aire incluido (en general, 0.04 m^3 por m^3 de hormigón), pudiendo también disminuirse el agua, por m^3 de hormigón, en la proporción de 3kg por cada 1% de aire incluido.
- El aumento de una bolsa de cemento (50 kg) por metro cúbico de hormigón viene a producir en éste un aumento de resistencia de 2,5 MPa.

Ejemplo 2.-

Ahora resolveremos el ejercicio del ejemplo 1 por el método Jiménez-Montoya, con algunas modificaciones para ajustarse a la EHE.

Los datos son:

- Fundación de un puente expuesto a agua dulce en un clima severo.
- $f'_{ck} = 21 \text{ MPa}$ a los 28 días.
- Revenimiento de 25 a 50mm (consistencia plástica, consolidación por vibrado)
- Tamaño máximo de 25mm (1").

Según ensayos de laboratorio, sobre el agregado, se obtuvieron los siguientes resultados:

	ARENA	GRAVA
Modulo de finura	2.8	7.32
Peso Unitario Varillado (kg/m^3)	-	1522
Gravedad Específica	2.64	2.68
% Absorción	0.7	0.5

Se utilizara cemento Tipo I con una gravedad específica de 3.15.

Cantidades de agua y cemento

- Para $f_{ck} = 21 \text{ MPa}$, interpolando A/C igual a 0,59 (tabla 11.11)
A/C igual a 0.6 (tabla 11.12). Se adopta el menor valor, por tanto $A/C = 0.59$
- Para una consistencia plástica, y áridos rodados de tamaño máximo 25 mm, interpolando se obtiene 185 lts de agua (tabla 11.15).
- El contenido de cemento resulta $185/0,59 = 314 \text{ kg/m}^3$.

Granulometría del árido total

- En principio, de la tabla 11.14 se toma el modulo de finura del árido total $MF = 5,43$, interpolando para un contenido de cemento de 314 kg/m^3 .

- Porcentajes de arena y grava, x e y:

$$P_A = \frac{5.43 - 7.32}{2.8 - 7.32} * 100 = 41.8$$

$$P_B = 100 - 41.8 = 58.2$$

Dosificación provisional

$$A + \frac{C}{p_c} + \frac{G_1}{p_1} + \frac{G_2}{p_2} = 1.025 \text{ m}^3 \Rightarrow 0.185 + \frac{314}{3150} + \frac{G_1}{2640} + \frac{G_2}{2680} = 1.025 \text{ m}^3 \left\{ \begin{array}{l} G_1 = 828 [\text{kg}] \text{ de arena por m}^3 \text{ de H}^\circ \\ G_2 = 1143 [\text{kg}] \text{ de grava por m}^3 \text{ de H}^\circ \end{array} \right.$$

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{58}{42} \quad \frac{G_2}{G_1} = \frac{58}{42}$$

- De la ecuación de volúmenes absolutos, resulta:

Agua.....	185	kg por m ³ de H ^o
Cemento.....	314	kg “
Arena.....	828	kg “
Grava	1143	kg “
Total.....	2470	kg “

Correcciones y ensayos

- Esta dosificación habrá que corregirla de acuerdo con la humedad que aporten los áridos, sobre todo las cantidades de agua y arena.
- Se deben realizar los ensayos pertinentes para comprobar que las características de la mezcla y del hormigón endurecido se ajustan a las del proyecto.

Estas correcciones, por humedad y las comprobaciones en laboratorio se pueden realizar de la misma manera que la descrita en los pasos 8 y 9 del método dado por la norma ACI 211.1 que se encuentran descrita anteriormente.

11.3.3.3. Ejemplos de otros métodos de dosificación (ver ANEXO 10)

Como es de suponerse existen varios otros métodos de dosificar hormigones. Con fines simplemente comparativos se desarrollaran a continuación ejemplos de dos métodos, cuya teoría se encuentra desarrollada en el Anexo 10.

Ejemplo 3.- Según el Método García Balado

Este método consiste en elegir la relación A/C que produzca el Hormigón de resistencia y durabilidad requerida, y la determinación más conveniente de los agregados que proporcionan la trabajabilidad necesaria al ser mezclados con el cemento y el agua, por medio de relaciones analíticas.

Resolución del ejercicio del ejemplo 1 por este método.

Datos:

- Fundación de un puente expuesto a agua dulce en un clima severo.
- $f'_{ck} = 21\text{MPa}$ a los 28 días.
- Revenimiento de 25 a 50mm (consistencia plástica, consolidación por vibrado)
- Tamaño máximo de 25mm (1").

Según ensayos de laboratorio, sobre el agregado, se obtuvieron los siguientes resultados:

	ARENA	GRAVA
Modulo de finura	2.8	7.32
Peso Unitario Varillado (kg/m³)	-	1522
Gravedad Específica	2.64	2.68
% Absorción	0.7	0.5

Se utilizara cemento Tipo I con una gravedad específica de 3.15.

- 1) De la Tabla I (Anexo10): Relación A/C = 0.6

De la Lámina I (Anexo10): Relación A/C = 0.64

$$\therefore A/C = 0.6$$

- 2) De la Tabla XI (Anexo10)= 2.5 a 10 cm

Según las condiciones dadas en el ejemplo = 2.5 a 5 cm

$$\therefore \text{Revenimiento} = 5\text{cm}$$

- 3) Tamaño máximo de agregado, dado para las condiciones del ejemplo = 25mm

$$4) \quad b_o = \frac{P_o + \frac{k \cdot P}{100}}{1000 \cdot P_s} = \frac{1522 + \frac{0.5 \cdot 1522}{100}}{1000 \cdot 2.68} = 0.57$$

- 5) De la tabla XII (Anexo10) e interpolando

$$\frac{b}{b_o} = \frac{(2.8 - 2.9) \cdot (0.65 - 0.66)}{2.9 - 2.75} + 0.65 = 0.66$$

$$b = \frac{b}{b_o} \cdot b_o = 0.66 \cdot 0.57 = 0.38$$

- 6) De Lamina III (Anexo10) $\Rightarrow a_o = 187\text{litros}$

Ajustando al asentamiento de 5cm

De 5 a 7.54.5%

$$187 - (187 \cdot 0.045) = 179 \text{ litros}$$

$$7) \frac{A}{C} = 0.6 \rightarrow C = \frac{A}{0.6} = \frac{179}{0.6} = 298 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Volumen absoluto de Cemento por m}^3 \text{ de H}^0 = \frac{298}{3.15 \cdot 1000} = 0.095 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen absoluto de Agua} = 0.179 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de la Pasta de Cemento} = 0.095 + 0.179 = 0.274 \text{ m}^3$$

$$8) \text{ Volumen absoluto de los Agregados} = 1 - 0.274 = 0.726 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen absoluto e la Arena} = 0.726 - 0.38 = 0.346 \text{ m}^3$$

$$\% \text{ de arena en volumen absoluto sobre el total de agregado} = \frac{0.346}{0.726} = 48\%$$

Cemento..... 298Kg
 Agua..... 179Kg
 Arena..... $0.346 \cdot 2640 = 913\text{Kg}$
 Grava..... $0.38 \cdot 2680 = 1018\text{Kg}$
Total.....2408Kg

Comparación de Resultados:

Método ACI 211.1*		Método Jiménez Montoya, basado en la EHE		Método Ing. García Balado	
Materiales	Peso [Kg] por m ³ de H ⁰	Materiales	Peso [Kg] por m ³ de H ⁰	Materiales	Peso [Kg] por m ³ de H ⁰
Agua de mezclado	179	Água	185	Água	179
Cemento	267	Cemento	314	Cemento	298
Agregado Grueso seco	1020	Grava	1143	Grava	1018
Arena seca: <i>Calculada por peso</i>	914	Arena	828	Arena	913
Total:	2380	Total:	2470	Total:	2408

* La comparación de resultados se realizó con las cantidades antes de realizar las correcciones.

Ejemplo 4.- Según el Método O'Reilly

Este método se basa en la experiencia en obra, por lo que asume la cantidad de cemento para un primer tanteo y se tantea la cantidad de agua para alcanzar en revenimiento deseado, en laboratorio. Se calculan los materiales para preparar 6 probetas estándar de 15cm de diámetro por 30 de altura.

Resolución del ejercicio del ejemplo 1 por el método O'Reilly.

Datos: $f'_c = 21$ MPa

Asentamiento requerido en el cono de Abrams = 5 cm

Según ensayos de laboratorio, sobre el agregado, se obtuvieron los siguientes resultados:

	ARENA	GRAVA
Modulo de finura	2.8	7.32
Peso Unitario Varillado (kg/m^3)	-	1522
Gravedad Específica (GE)	2.64	2.68
% Absorción	0.7	0.5

Paso 1.- Determinar la relación óptima de la mezcla de los agregados para alcanzar el porcentaje de vacíos mínimo (NB 608; ASTM C29 (peso unitario varillado seco)), realizando el ensayo con 5 proporciones de Arena:Grava, pudiendo ser las siguientes: 35:65; 60:40; 45:55; 50:50; 55:45.

Primero se determina el peso unitario seco (PU_m) para cada una de las proporciones. Luego se determina la gravedad específica de la mezcla, según la ecuación:

$$GE_m = \frac{GE_a \cdot \%A + GE_G \cdot \%G}{100} = \frac{2640 \cdot \%A + 2680 \cdot \%G}{100}$$

Remplazando %A(arena) y %G(grava)
según la proporciones realizadas

Ahora calculamos el % de vacíos según la ecuación:

$$\% \text{ de vacíos} = \frac{GE_m - PU_m}{GE_m} \cdot 100$$

Determinamos el porcentaje de vacíos para todas las mezclas y escogemos el menor, para este ejemplo consideraremos que la relación 45% de Arena y 55% de Grava la que dio el menor resultado, y que dio un $PU_m = 2015 (\text{kg/m}^3)$.

Paso 2.- Según la experiencia para la resistencia requerida, preparamos una mezcla con una dosis de cemento de 300 Kg/m^3 (esta será ajustada luego), preparamos la mezcla y tanteando vamos aumentando la cantidad de agua poco a poco hasta conseguir un revenimiento de 5cm. (esto sacando muestras periódicamente cada vez que aumentemos agua y realizando el ensayo del cono de Abrams), supongamos que para este ejemplo resulto ser $173 \text{ Lts/m}^3_{\text{de H}^0}$.

Entonces la relación agua cemento será $A/C = 173/300 = 0,57$

De la tabla 1 (Anexo 10) según el asentamiento dado en el cono=5cm se tienen los valores de $M_1=4,3239$ y $M_2=0,3101$

De la tabla 2 (Anexo 10) tomamos el valor de V mas próximo que corresponde con nuestra relación A/C, que es $V=0,2441$.

Paso 3.- A los 28 días determinamos la resistencia del Hormigón, resultado de las 6 probetas preparadas, lo que nos da $R_h=23,4$ MPa, y la resistencia real del cemento empleado (habiendo

preparado probetas de este el mismo día que preparamos las probetas de ensayo) (ensayo de Compresión (NB 470; ASTM C109)), que dio para este ejemplo una resistencia de $R_c=32,3$ MPa.

Paso 4.- Ahora se determina la característica A de los agregados, mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{R_h}{R_c(M_1 \cdot V + M_2)} = \frac{234}{323 \cdot (4,3239 \cdot 0,2441 + 0,3101)} = 0,5305$$

Paso 5.- Luego de determinada la característica A del agregado, se puede calcular cualquier tipo de mezcla.

En este caso se debe corregir la cantidad de cemento, ya que esta fue simplemente estimada y los resultados fueron mayores al requerido:

Para esto primero se calcula el valor de V , despejando de la ecuación anterior, pero colocando el valor deseado de R_h :

$$V = \frac{\frac{R_h}{R_c \cdot A} - M_2}{(M_1)} = \frac{\frac{210}{323 \cdot 0,5305} - 0,3101}{4,3239} = 0,2117$$

De la Tabla 2 (anexo 10) tomamos el valor correspondiente, para la relación $a/c=0,60$, entonces, si se necesitaron 173 lts de agua para alcanzar el revenimiento deseado, determinamos la cantidad resultante necesaria real de cemento:

$$c=173/0,6=288 \text{ kg/m}^3,$$

Con esto tenemos las cantidades de los materiales a utilizar:

Método ACI 211.1*	
Materiales	Peso [Kg] por m³ de H⁰
Agua de mezclado	173
Cemento	288
Agregado Grueso seco	$PU_m \cdot 0,55 = 1108$
Arena seca:	$PU_m \cdot 0,45 = 906$
Total:	2476

Ejercicio propuesto.-

Tantear una dosificación para las siguientes condiciones encontradas en obra:

Las especificaciones indican que se puede utilizar agregado de tamaño máximo de 40 mm. Y el proyecto considero una resistencia $f_{ck} = 25$ MPa.

Resultados obtenidos de agregados económicamente disponibles, y de buena calidad:

	ARENA	GRAVA
Modulo de finura	3.16	7.35
Peso Unitario Varillado (kg/m³)	-	1522
Gravedad Específica	2.60	2.60
% Absorción	0.9	0.7

El cemento utilizado tiene una gravedad específica de 3.1

Por las características del elemento se requiere que la pasta tenga una consistencia plástica-blanda, para compactar mediante vibrado.

11.3.4. DETERMINACIÓN DE LAS PROPORCIONES MEDIANTE CURVAS DE RESISTENCIA PARA MEZCLAS DE PRUEBA

Este método consiste en encontrar las proporciones de la mezcla deseada, a partir de 3 ó 4 mezclas de prueba, con contenidos diferentes de cemento y revenimiento constante. La cantidad de agua por metro cúbico será la misma para todas las muestras, esto conducirá a la obtención de 3 ó 4 relaciones A/C, espaciadas de tal modo que se lograra un rango de resistencias a la compresión que abarca las requeridas para el proyecto. Los datos obtenidos de cada mezcla deben incluir: la relación A/C, el porcentaje de aire, el revenimiento y las características de trabajabilidad. El cálculo de las proporciones para las mezclas de prueba puede ser realizado por cualquiera de los métodos anteriormente desarrollados, por supuesto no es necesario calcular las correcciones ya que los resultados se van a situar en una grafica, en sus puntos reales sobre la curva.

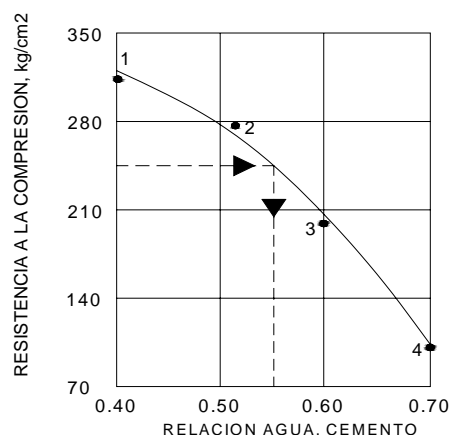
Se debe tener en cuenta que los materiales utilizados para todas las muestras deben ser los mismos que se tendrán en obra.

En la figura 11.3 se muestra una curva típica de resistencia a la compresión desarrollada a partir de 4 mezclas de prueba. Con base en esta curva, se toma la resistencia requerida para el proyecto, la relación A/C y el diseño correspondiente para un conjunto dado de materiales.

Ejemplo 5.-

Se diseñan 4 mezclas, 1, 2 ,3 y 4, todas con el mismo revenimiento, y materiales. Luego se fabrican probetas que son ensayadas a los 28 días, los resultados son graficados como se muestra en la figura 11.3.

Lo que se requiere ahora es encontrar las proporciones para una mezcla que de una resistencia requerida de 240 kg/cm². Entonces se va a la grafica, se encuentra el valor de 240 kg/cm², se lleva hasta chocar con la curva y se baja para encontrar la relación A/C. Si es que por consideraciones de durabilidad no se requiere que la relación A/C sea menor, se toma el valor encontrado, A/C=0.55.

**FIGURA 11.3** Dosificación de las mezclas y pruebas

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 4

Luego para determinar las proporciones para una mezcla que dará una resistencia a la compresión de 242 kg/cm^2 , se interpola entre las mezclas entre las que se encuentra la que se desea:

	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla de diseño de 240 kg/cm^2
A/C	0,5	0,6	0,55
Agua [kg]	139	136	137
Cemento [kg]	278	227	252
Agregado fino* [kg]	508	562	535
Agregado grueso* [kg]	885	885	885

* El peso de los agregados se refiere a la condición de base saturada y seca en la superficie

11.3.5. MEZCLAS PARA TRABAJOS PEQUEÑOS

En trabajos pequeños² donde no se dispone de tiempo ni de personal para determinar las proporciones de acuerdo a los procedimientos recomendados, se pueden utilizar los valores dados en la tabla 11.17, que en general darán como resultado un hormigón resistente y durable. Estas mezclas han sido diseñadas según el procedimiento recomendado en la ACI 211.1, asumiendo condiciones dadas en los trabajos pequeños y para un agregado de un peso específico promedio.

Procedimiento:

- Se dan 3 mezclas (A, B, C) y las cantidades de arena, grava y cemento, para cada tamaño máximo de agregado grueso.
- Según el tamaño máximo seleccionado, se empieza con la mezcla B y se agrega el agua que precisa para obtener la trabajabilidad deseada. Si al mezclar se aprecia que tiene demasiada arena (visualmente y por su trabajabilidad), se cambia a la mezcla C; en cambio si tiene muy poca arena se cambia a la mezcla A.

² Como “trabajos pequeños” se entienden aquellas que no necesitan supervisión continua, estructuras que tienen una resistencia menor a 200MPa.

TABLA 11.17 DOSIFICACIÓN PARA MEZCLAS EN TRABAJOS PEQUEÑOS

Tamaño máximo del agregado	Designación de la mezcla	Peso aproximado de los ingredientes sólidos por metro cúbico de hormigón, kg			
		Cemento	Arena*		Agregado grueso
			Hormigón con aire incluido	Hormigón sin aire incluido	Grava o piedra triturada
12 mm (½")	A	400	770	815	865
	B	400	735	785	900
	C	400	705	755	930
20mm (¾")	A	370	720	785	995
	B	370	690	755	1025
	C	370	660	720	1060
25mm (1")	A	355	660	720	1120
	B	355	625	690	1150
	C	355	593	655	1185
38mm (1½")	A	320	655	720	1200
	B	320	625	690	1235
	C	320	595	655	1265
50mm (2")	A	305	640	720	1266
	B	305	610	690	1300
	C	305	555	655	1330

* Estos pesos son para arena seca, si se utiliza húmeda, aumentar 1kg al peso de la arena. Si se utiliza arena mojada, aumentar 2kg.
Fuente: Referencia 4

11.3.6. DOSIFICACIÓN EN VOLUMEN

Se obtiene dividiendo los pesos calculados por los pesos específicos aparentes que pueden ser de 1.55 para la arena y 1.65 para la gravilla, todos ellos en kilogramos por litro [kg/lit]. El *cemento no debe dosificarse nunca en volumen*.

Vale la pena reiterar, que el volumen aparente de los materiales puede variar, significativamente en el caso de la arena (apartado 2.8.1), por lo que en lo posible esta dosificación se debe evitar. Y en ningún caso se debe utilizar, mas que para obras de poca importancia.

11.3.7. AJUSTES EN EL CAMPO

Las mezclas diseñadas siempre deben afinarse en el campo. Esto es necesario en virtud de las muchas variables que influyen sobre las proporciones de las mezclas, por ejemplo la temperatura alterará el revenimiento y, por consiguiente, provocará un cambio en la relación A/C para un revenimiento igual; las variaciones en las gradaciones y forma del agregado influirán sobre el requisito de agua.

Como guía se pueden dar los siguientes datos:

- En general, un aumento de 0.20 en el módulo de finura exigirá una disminución de 30kg del

agregado grueso por m^3 de hormigón, con un aumento de un volumen igual de agregado fino. Esto, a su vez, podría causar un aumento en el contenido de agua de hasta un 4%. Lo anterior sería inversamente cierto para una disminución de 0.20 en el módulo de finura.

- Los cambios en la gradación del agregado grueso pueden influir en el contenido de vacíos, lo cual cambiaría la cantidad de arena requerida. Esto se reflejaría en un cambio en el peso unitario varillado seco. Para un agregado de especificaciones dadas, una disminución en el peso unitario significa un aumento en el contenido de vacíos y, como consecuencia, aumenta el requisito de agregado fino. Un cambio en la forma de las partículas que consista en una proporción mayor de trozos planos y alargados requeriría más arena y agua para un revenimiento igual. Lo inverso también es cierto.
- Cada aumento de 2.5cm en el revenimiento causará un incremento del 3% en el agua.
- En general es aceptable tener variaciones de más o menos 0.02 en las relaciones agua/cemento, sin cambiar las proporciones.

11.3.8. CONCLUSIONES

En nuestro medio se acostumbra definir las proporciones de la mezcla en volumen, mediante la relación cemento:arena:grava, y se ha generalizado el uso del 1:2:3, que no toma en cuenta ninguna consideración ni de los materiales ni de las condiciones de exposición de la estructura, por lo que los resultados esperados en los hormigones dosificados de esta manera, son simplemente imprevisibles en el tiempo, y muy probablemente malos. Además esta dosificación, se refiere únicamente a los componentes sólidos y, a menos que la relación A/C se especifique en forma separada, son insuficientes para definir las propiedades del hormigón resultante.

Si se pide una resistencia deseada, debe darse la cantidad de agua (o el revenimiento) junto con las proporciones de los materiales secos.

Lo que se intenta decir con esta observación es que no pueden utilizarse arbitrariamente dosificaciones, sin antes realizar un estudio de los resultados que se esperan de estas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI 318M-02/318RM-02(metric) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
2. ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
3. EHE (Instrucción de Hormigón Estructural) Artículo 68, Dosificación del Hormigón, http://www.mfom.es/cph/norma_ehe.html.
4. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) "Manual de la Construcción con Concreto". 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
5. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". 14ª ed., Gustavo Gili, SA, Barcelona.
6. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)
7. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association "Design and Control of Concrete Mixtures". 14ª ed., www.portcement.org

IV

ENSAYOS

CAPITULO 12

ENSAYOS

12.1. GENERALIDADES

En este capítulo describiremos los métodos de ensayo más comunes que se realizan con el hormigón. De ellos, unos se refieren al *hormigón fresco* y tienen como finalidad conocer las características del mismo; y otros se refieren al *hormigón endurecido*, siendo su objeto determinar sus cualidades y, fundamentalmente, su resistencia.

Los métodos de ensayo utilizados hoy en día para la determinación de las distintas características del hormigón varían poco de unas normas a otras, las normas bolivianas hacen referencia entre muchas otras a la ASTM y la UNE; en este texto, cada ensayo tendrá su referencia a la Norma Boliviana y a la ASTM, esta última más actualizada y que se puede encontrar fácilmente en nuestro medio.

Otros ensayos de interés sobre el hormigón que no desarrollaremos en este documento, serán referenciados al final de este capítulo, para quien desee consultarlos.

Dentro de la elaboración de este texto se contó con la colaboración de la Empresa “COBOCE HORMIGÓN” dirigida por el Ing. Echeverría, quien nos facilitó sus instalaciones y su amplio equipo de laboratorio, donde se pudo realizar gran parte de los ensayos descritos debajo, y cuyos resultados se presentan en el anexo 2.

12.2. ENSAYOS DEL HORMIGÓN FRESCO

12.2.1. TOMA DE MUESTRAS DEL HORMIGÓN FRESCO (NB 634 – ASTM C172)

Para realizar las muestras a ser usadas en los ensayos de resistencia, se requiere un mínimo de 28 lts (0.028m^3). Muestras más pequeñas no están prohibidas para ensayos de rutina de contenido de aire, temperatura y revenimiento.

El procedimiento usado en el muestreo debe incluir el uso de toda precaución que permitan obtener muestras que sean realmente representativas de la naturaleza y características del hormigón.

A continuación se indica el procedimiento indicado por la norma NB 634:

Las muestras deberán ser lo más representativas del hormigón objeto de control, para lo que se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cuando se trate de mezcladoras fijas o camiones hormigoneros, la muestra debe obtenerse pasando el recipiente de recogida a través de toda la corriente de descarga, o haciendo que dicha corriente vaya a parar al recipiente para obtener el volumen necesario. Debe cuidarse que la velocidad de descarga no sea tan pequeña que pueda producirse la segregación del hormigón.
- Las muestras para los distintos ensayos se tomarán en el intervalo de vertido más o menos a la mitad de la descarga, no al principio ni al final.
- Cuando se trate de hormigoneras de pavimentación o en cualquier tipo de transporte en donde no sea posible tomar las muestras durante la descarga, la muestra se compondrá tomando al azar, al menos, cinco porciones de la descarga completa del hormigón. Las cinco porciones se tomarán distribuidas en el interior de la masa evitando los bordes de la misma y en donde hayan podido producirse segregaciones.
- La muestra debe estar protegida del sol, viento y lluvia, debiendo evitarse su desecación. Antes de su utilización para preparar la muestra para el ensayo, se vuelve a mezclar sobre una plancha metálica perfectamente limpia y ligeramente humedecida. El período de tiempo entre la toma de la muestra y su utilización no debe exceder de 15 min.

12.2.2. ENSAYOS DE CONSISTENCIA

Los métodos para medir la consistencia del hormigón fresco son numerosos y empíricos. Aunque no existe un método universal, el más comúnmente utilizado (y también el más sencillo) es el *Cono de Abrams*, empleándose también el *Consistómetro Vebe* para hormigones muy secos. A continuación describimos cada uno de estos ensayos:

12.2.2.1. DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA POR EL MÉTODO DEL CONO DE ABRAMS (REVENIMIENTO) (NB 589; ASTM C143)

Se utiliza un molde sin fondo de forma troncocónica, provisto de dos asas para manipularlo, con dimensiones y forma como se muestran en la figura 12.1

1. Humedézcase el interior del cono y colóquese sobre una superficie plana, húmeda y no absorbente. La superficie debe ser firme y estar nivelada.
2. Se introduce el hormigón en tres capas, siendo cada una un tercio de la capacidad del molde, varillando cada capa 25 veces, llegando hasta la siguiente capa pero sin atravesarla, distribuyendo

el varillado de manera uniforme sobre toda el área. La varilla compactadora estándar será de acero de 16mm de diámetro por 60cm de largo, con uno de sus extremos redondeados para formar una punta hemisférica. No debe emplearse un trozo de acero de refuerzo (ver figura 12.2)

3. Úsese la varilla compactadora para eliminar el exceso de hormigón de la parte superior del cono y límpiase el hormigón derramado alrededor del fondo del cono.
4. Levántese el cono verticalmente, con lentitud y cuidado. Evítese realizar un movimiento de torsión, sacudir o chocar el cono contra el hormigón.
5. Colóquese el cono de revenimiento sobre la superficie cercana al hormigón revenido, pero de modo que no toque éste; tiéndase la varilla compactadora a través de la parte superior del cono. Mídase la cantidad de revenimiento, desde la parte de abajo de la varilla hasta la parte superior de la muestra revenida, sobre el centro original de la base de esta última (Véase la figura 12.2).
6. Deséchese este hormigón una vez que se ha medido el revenimiento. No debe utilizarse para hacer los cilindros de prueba.

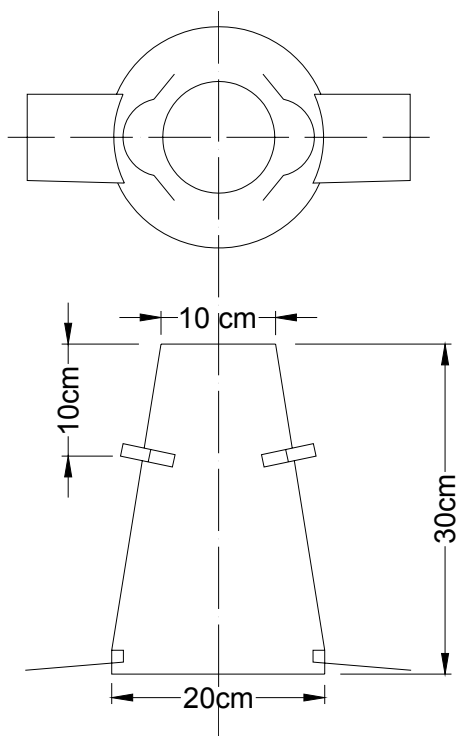


FIGURA 12.1 Equipo para el ensayo de revenimiento

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 4



FIGURA 12.2 Ensayo de revenimiento

(Laboratorio COBOCE HORMIGÓN, Cochabamba)

Fuente: Propia

Consideraciones para el ensayo:

- Este ensayo es aplicable a hormigón plástico con agregado grueso de tamaño máximo de hasta 40mm ($\cong 1\frac{1}{2}$ "). Si el agregado grueso es mayor que 40mm, se debe remover el agregado más grande a esta medida por tamizado del hormigón en estado fresco.
- La prueba de revenimiento no se considera aplicable al hormigón no plástico y no cohesivo. Hormigones con revenimientos menores a 15mm pueden no ser lo suficientemente plásticos y hormigones con revenimiento mayor a 230mm pueden no ser lo suficientemente cohesivos, por lo cual el ensayo sería poco significativo.

12.2.2.2. CONSISTÓMETRO VEBE (ASTM C1170)

El consistómetro Vebe, desarrollado en Suecia, proporciona una medida bastante precisa de la consistencia de hormigones muy secos. Si el ensayo del cono de Abrams da revenimientos menores a 1.5cm, es poco significativo por lo que se debe utilizar el método del consistómetro Vebe.

Estos hormigones se utilizan en construcciones donde se utilizara Hormigón compactado con rodillo (apartado 20.3).

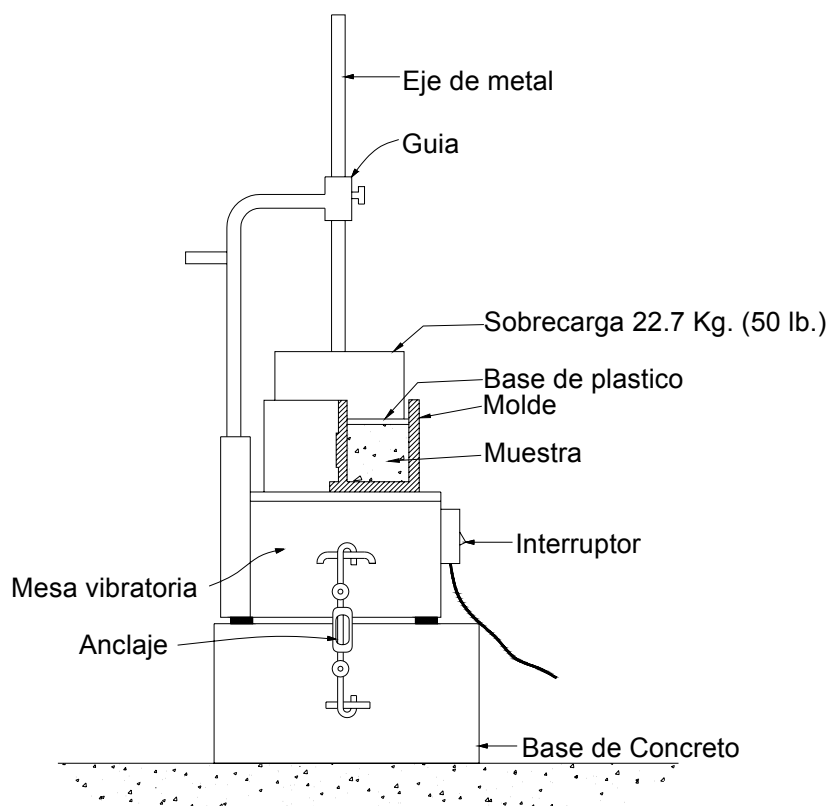


FIGURA 12.3 Consistómetro Vebe

Fuente: Referencia 3

Existen dos procedimientos:

Método A: Usando una sobrecarga de 22.7 kg (50 lb) colocada encima de la muestra. Este método debe ser utilizado en hormigón de consistencia muy seca, de acuerdo a la tabla 12.1

Método B: (Sin sobrecarga). Este método debe ser utilizado en hormigón de consistencia muy seca o cuando el tiempo por el Método A es menor a 5 segundos

El procedimiento para el método A es básicamente el siguiente:

1. Se obtiene una muestra representativa de por lo menos 22.7 kg.
2. Humedecer el interior del molde y llenar con 13.4 ± 0.7 kg de hormigón. Se asegura el molde a la mesa vibratoria.
3. Se coloca una placa de plástico de diámetro ligeramente menor al diámetro interno del molde, encima se coloca la sobrecarga al centro de la muestra y sobre la placa de plástico.
4. Encender la mesa vibratoria y el cronometro, hasta que la superficie del hormigón se ha extendido lo suficiente para establecer un contacto completo con la placa de plástico.
5. Contabilizar el tiempo transcurrido, en minutos y segundos.
6. Si no se observo esta situación hasta un periodo de 2 minutos, detener la mesa vibratoria y el cronometro y reportar esta condición.

Además con este ensayo se puede determinar la densidad del hormigón fresco compactado.

Para mayores detalles sobre este ensayo revisar la norma ASTM C1170.

TABLA 12.1. CONSISTENCIAS UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN, RELACIÓN ENTRE DIFERENTES ENSAYOS

	Cono de Abrams Revenimiento mm	Tiempo de Vebe seg.
Extremadamente seca	-	32 a 18
Muy seca	-	18 a 10
Seca	0 a 25	10 a 5
Seca plástica	25 a 75	5 a 3
Plástica	75 a 125	3 a 0 *
Muy plástica	125 a 190	-
Fluida	mas de 190	-

* En este rango el método es poco significativo

Fuente: Referencia 8

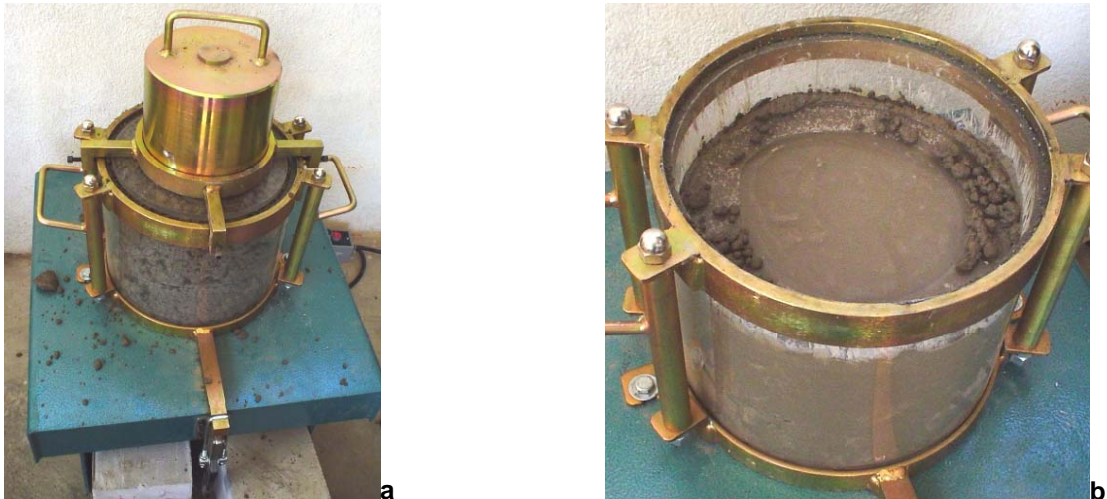


FIGURA 12.4 Consistómetro de vebe (mesa vibratoria)

Método A: a) inicio del ensayo, la muestra en el interior, la sobrecarga encima, b) después del ensayo
(Laboratorio COBOCE HORMIGÓN, Cochabamba)

Fuente: Propia

12.2.3. DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO DEL HORMIGÓN FRESCO

(NB 590; ASTM C 138)

1. Se utiliza un molde rígido y estanco cuya dimensión dependerá del tamaño máximo del árido, del cual se determinan su capacidad y su peso. El molde se rellena en tres capas iguales y se compacta con una varilla con punta redondeada distribuyendo 25 golpes uniformemente sobre toda el área.
2. Se determina la masa del hormigón restando de la masa total la masa del molde. Esta se divide por el volumen del molde y se obtiene el Peso Unitario, que se expresará en kg/m^3 .

Nota.- El peso unitario se puede determinar luego de haber preparado las probetas para el ensayo de resistencia.

12.2.4. CONTENIDO DE AIRE

La medición de la cantidad de aire incluido en el hormigón fresco, durante el vaciado, es esencial para mantener la calidad deseada. Debe desecharse la parte usada para la prueba del aire y no se debe usar para ninguna otra prueba.

Existen tres procedimientos cubiertos por la ASTM, a continuación se dará una breve reseña de estos:

1. El método gravimétrico (ASTM C138).- Éste se calcula con base en el conocimiento de las proporciones de la mezcla y de las gravedades específicas de todos los materiales. El peso teórico sin aire se puede usar como una constante, cuando la consistencia de la mezcla permanece inalterada.

En general no se recomienda para el control en campo en virtud de las probables imprecisiones. Un error del 2% en el contenido de humedad del agregado puede causar un error del 1% en el aire indicado, y un error del 0.02% en la gravedad específica del agregado puede causar un error del ½% en el contenido calculado de aire.

2. El método volumétrico (ASTM C173).- Conocido comúnmente como método del Roll-A-Meter, es necesario para el hormigón hecho con agregados ligeros, escoria y cualquier otro agregado vesicular, pero también se puede aplicar para hormigón con cualquier tipo de agregado. En él se utiliza el principio de la determinación directa del aire por desplazamiento en agua.
3. El método de la presión (ASTM C231).- Es el más común y el más exacto para todos los hormigones, excepto el ligero (para el cual se requiere el método volumétrico). En el método de la presión se aplica el principio de la ley de Boyle, para determinar el contenido de aire por la relación entre la presión y el volumen. El fabricante de cada medidor proporciona instrucciones detalladas para la operación y calibración con relación a las variaciones en la presión atmosférica.

12.3. ENSAYOS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Los ensayos principales sobre el hormigón endurecido son los correspondientes a sus resistencias mecánicas.

No es fácil definir las resistencias de un hormigón, ya que su comportamiento frente a los distintos esfuerzos a que ha de estar sometido, es variable y complejo. Los valores de resistencias obtenidos con los ensayos pueden servir de base y punto de referencia, estos dependen de muchos factores: unos de ellos, ligados con el material en sí (granulometría, calidad de cemento y áridos, dosificación, confección, etc.); y otros, dependientes de los métodos de ensayo (forma y dimensiones de las probetas, conservación de las mismas, edad, tipo de sollicitación, velocidad de carga, etc.).

12.3.1. ENSAYOS MECÁNICOS DE RESISTENCIA

Según su naturaleza, los métodos de ensayo, normalmente empleados para determinar las resistencias del hormigón, pueden clasificarse en *destructivos* y *no destructivos*.

a) *Los ensayos destructivos son* aquéllos que determinan la resistencia mediante la rotura de probetas o piezas de hormigón. Las probetas pueden fabricarse en moldes apropiados o bien extraerse de una obra ya construida.

b) *Los ensayos no destructivos* determinan la calidad del hormigón sin destruir la pieza o estructura ensayada.

12.3.1.1. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Los métodos de ensayo que se describen a continuación tienen por objeto obtener las resistencias del hormigón a compresión, a flexotracción y a tracción indirecta, mediante la rotura de probetas fabricadas y conservadas en condiciones normalizadas.

La toma de muestras del hormigón fresco para la confección de las probetas ya ha sido descrita en el apartado 12.2.1 de este mismo capítulo.

12.3.1.1.1. EQUIPO (ASTM C31)

Moldes.- Deben ser rígidos (que no se deformen con el uso), no absorbentes e impermeables, siendo conveniente untarlos con aceite mineral o cualquier otra sustancia apropiada que no ataque al cemento, con objeto de evitar la adherencia del hormigón.



FIGURA 12.5 Probetas para el ensayo de resistencia a compresión y a tracción indirecta
(Laboratorio COBOCE HORMIGÓN, Cochabamba)
Fuente: Propia

Barra para el varillado.- debe ser recta, de acero, de 16 mm de diámetro y longitud de 60 cm. La punta debe estar redondeada (fig. 12.2). Está demostrado que si se emplea una barra recta con su extremo cortado sin redondear, la probeta presenta una resistencia menor.

Vibradora.- Esta debe tener un diámetro menor a 1/3 del diámetro del molde, la frecuencia del vibrador debe ser de por lo menos 6000 vibraciones por minuto.

12.3.1.1.2. PREPARACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LAS PROBETAS (NB-586; ASTM C31)

1. COMPACTACIÓN

El método de compactación a ser utilizado en las probetas se escoge según el revenimiento, como se ve en la tabla 12.2.

TABLA 12.2. REQUERIMIENTOS PARA EL MÉTODO DE COMPACTACIÓN

Revenimiento (mm)	Método de compactación
> 75	Varillado
De 25 a 75	Varillado o vibrado
< 25	Vibrado

Fuente: Referencia 5

a) Compactación por varillado

Colocar el hormigón en el molde según el número de capas iguales y número de golpes como se indica en la tabla 12.3.

El procedimiento de varillado es similar al descrito en el ensayo de consistencia del cono de Abrams.

TABLA 12.3. REQUISITOS PARA COMPACTACIÓN POR VARILLADO

Tipo y tamaño de la muestra	Numero de capas	Numero de golpes por capa	Espesor de la capa [mm]
Cilindros Diámetro [mm]			
100	3	25	1/3 de la altura del molde
150	3	25	1/3 de la altura del molde
225	4	50	112
Vigas Ancho [mm]			
De 150-200	2	1 c/15cm ²	1/2 de la altura del molde
>200	3 ó más	1 c/15cm ²	De 75 a 100

Fuente: Referencia 5

b) Compactación por vibrado

Llenar los moldes y vibrar el número de veces requerido según la tabla 12.4. El tiempo de vibración debe ser el requerido para lograr una compactación apropiada del hormigón.

Por lo general se sabe que el tiempo de vibración ha sido suficiente cuando la superficie del hormigón se vuelve lisa. Una sobre-vibración puede causar segregación. La vibradora no debe tocar el fondo ni las paredes del molde.

TABLA 12.4. REQUISITOS PARA COMPACTACIÓN POR VIBRADO

Tipo y tamaño de la muestra	Numero de capas	Numero de Vibradas por capa	Espesor de la capa [mm]
Cilindros Diámetro [mm]			
100	2	1	½ de la altura del molde
150	2	2	½ de la altura del molde
225	2	4	½ de la altura del molde
Vigas Ancho [mm]			
De 150-200	1		Altura del molde
>200	2 ó más		200

Fuente: Referencia 5

2. ACABADO DE LA PROBETA

Una vez compactado el hormigón, la cara superior de la probeta cilíndrica debe ser enrasada con pasta de cemento, de forma tal que no se presenten irregularidades.

Las probetas se manipularán lo menos posible y se cubrirán de manera adecuada, para evitar pérdida de humedad.

3. CONSERVACIÓN

Las probetas destinadas al control de calidad de la resistencia del hormigón deben quedarse en los moldes al menos durante 24 horas, conservándose a una temperatura comprendida entre 16°C y 27°C hasta el momento de ser transportadas a la cámara de conservación. Este transporte deberá efectuarse, con sumo cuidado, antes de que transcurran 48 horas.

El lugar de conservación consiste en una cámara que mantiene una humedad relativa igual o superior a 95 % y una temperatura de 20°C±2. Esta cámara puede sustituirse por un tanque de inmersión, cuya agua, de pH igual o mayor que 5, deberá estar a la misma temperatura indicada. Cuando se trate de probetas fabricadas con cemento Pórtland, el agua del tanque debe estar saturada de cal, pero no así si se trata de cemento Pórtland con adiciones activas.

Las probetas se mantendrán de esta forma hasta el momento de la rotura, ya sea a los 7, 14, 28 días, etc.

12.3.1.1.3. REFRENTADO DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS CON MORTERO DE AZUFRE (ASTM C617)

Una vez curada la probeta y antes del ensayo de compresión, es necesario refrentar la cara superior con mortero de azufre, con objeto de obtener una superficie de mayor regularidad.

El refrentado del hormigón endurecido se efectúa con un mortero de azufre obtenido mediante un tratamiento térmico adecuado, de una mezcla de azufre, arena y, eventualmente, un fundente idóneo.

La capa de refrentado debe tener un espesor medio superior a 3 mm y su valor máximo, en cualquier punto, debe ser inferior a 8 mm. Dicha capa debe estar exenta de fisuras, huecos y burbujas, y su resistencia a la compresión nunca será inferior a la correspondiente de la probeta que se ensaya. Para que esta capa gane la resistencia adecuada se debe esperar 2 horas antes de realizar el ensayo.

12.3.1.1.4. MÉTODOS DE ENSAYO DE PROBETAS DE HORMIGÓN

Los ensayos de las probetas pueden efectuarse en cualquier máquina de ensayo, de capacidad suficiente, siempre que la carga se aplique de una manera continua y sin saltos.

Las probetas que se hayan conservado según lo indicado en el inciso b) del apartado 12.3.1.1, deben ensayarse en estado húmedo. Los ensayos de estas probetas deben tener lugar tan pronto como sea posible, después de retiradas de la sala de conservación, procurando cubrirlas, durante el intervalo correspondiente, con trapos u otros elementos mojados.

1) MÉTODO DE ENSAYO A COMPRESIÓN (NB 639)(ASTM C39)

Para los ensayos de compresión se suelen usar probetas cilíndricas donde la altura es el doble del diámetro de la base. Cuando el tamaño máximo del agregado es menor a 5cm (2") se utilizan cilindros de 15cm de diámetro por 30cm de altura, si se utiliza un agregado mas grande, el diámetro del cilindro será por lo menos 3 veces el tamaño máximo del agregado.

Se pueden utilizar moldes cilíndricos, prismáticos ó cúbicos, de distintas dimensiones, de acuerdo a lo especificado en la tabla 3.4.a) de la CBH 87. Deberá hacerse constar en estos casos, la forma y dimensiones del molde junto a los resultados de los ensayos.

a) Una vez preparada la prensa, se limpiarán las superficies en contacto, y se coloca la probeta alineada con el centro de la prensa. En el caso de los cubos, estos deben ensayarse, preferentemente, sobre las caras laterales que corresponden al molde. Para la compresión transversal de los prismas, los platos deben tener unas dimensiones tales que las caras de contacto sean realmente

cuadradas y tengan las mismas dimensiones que la arista nominal del prisma objeto de ensayo.

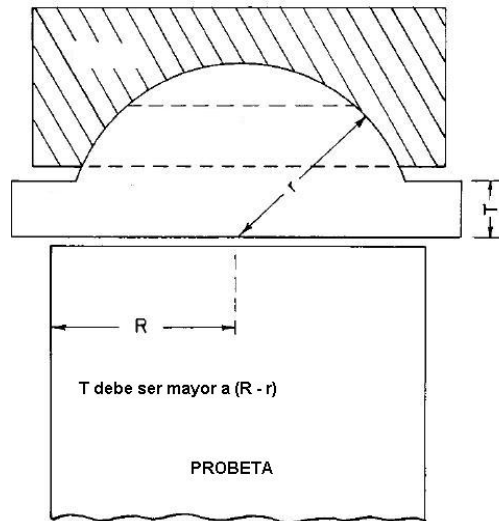


FIGURA 12.6 Detalle del plato superior, y la probeta

Fuente: Referencia 1

b) La carga debe aplicarse de una manera continua y sin saltos, a una velocidad constante, hasta la rotura, registrando la carga máxima soportada por la probeta.

La resistencia a la compresión será:

$$f_c [MPa] = \frac{P [N]}{A [mm^2]}$$

Donde

f_c = resistencia a la compresión de la probeta

P = Carga de rotura registrada por la prensa

A = Área transversal de la probeta (calculada con el promedio de dos diámetros perpendiculares).



FIGURA 12.7 Ensayo de rotura a compresión. A la derecha se pueden ver 2 probetas luego de la rotura, la de la derecha por falla lateral, y la otra por falla troncocónica

(Laboratorio COBOCE HORMIGÓN, Cochabamba)

Fuente: Propia

2) MÉTODO DE ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN (NB 640)(ASTM C78)

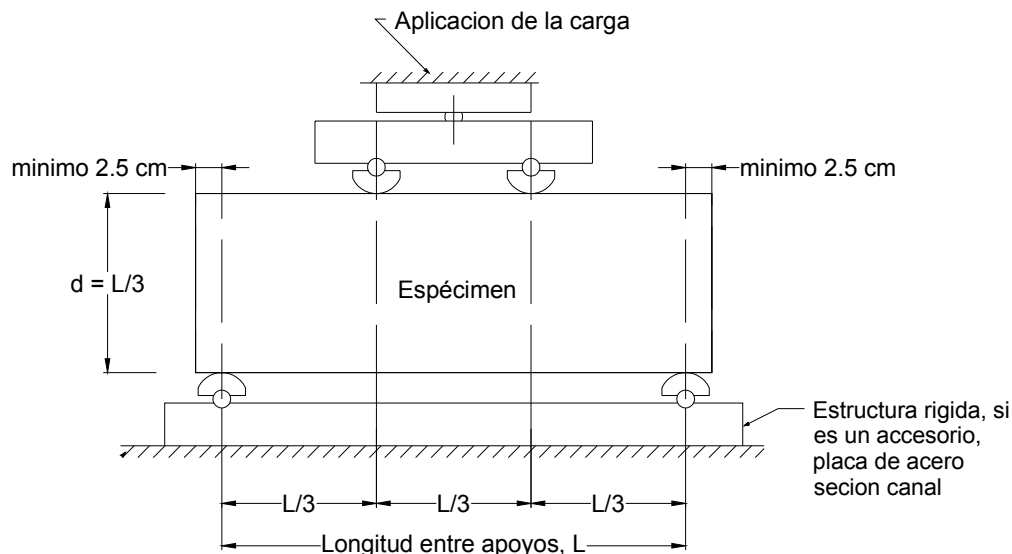


FIGURA 12.8 Método de ensayo de flexotracción

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 6

- a) El ensayo suele efectuarse sobre probetas prismáticas de sección cuadrada $a \times a$ y una longitud L de $4a$ o $5a$, siendo la luz entre apoyos $L_a = 3a$.

Las dimensiones a emplear son:

- para árido de 25 mm 10 x 10 x 50 cm
- para árido de 38 mm 15 x 15 x 75 cm
- para árido de 50 mm 20 x 20 x 100 cm

- b) Se debe mantener las muestras en agua por 40 h antes del ensayo.
- c) Las probetas se rompen a flexión mediante la aplicación de dos cargas iguales y simétricas, colocadas a los tercios de la luz (figura 12.8). El mecanismo para la aplicación de la carga se compone de dos rodillos de acero de 20 mm de diámetro, y otros dos para el apoyo de la probeta. Es importante que las probetas se apoyen y reciban la carga sobre las dos caras laterales que estuvieron en contacto con el molde; primero, porque así no es necesario refrentarlas; y segundo, porque se elimina la influencia de la distinta compacidad del hormigón junto al fondo y en la superficie.
- d) La carga se aplica de forma continua sin choques bruscos. La *resistencia a flexotracción* se calcula mediante la fórmula clásica:

$$f_{ct} = \frac{P \cdot L_a}{b \cdot d^2}$$

Donde: f_{ct} = Resistencia a la flexotracción
 P = Carga de rotura [N]
 b = ancho promedio de la muestra en el lugar de la falla [mm]
 d = altura promedio de la muestra en el lugar de la falla [mm]
 L_a = distancia entre apoyos [mm]



FIGURA 12.9 Ensayo de flexotracción

(Laboratorio COBOCE HORMIGÓN, Cochabamba)

Fuente: Propia

El **Ensayo de Flexotracción** da como resultado el módulo de rotura, que es el esfuerzo en la fibra más alejada del eje neutro. Debido a que este esfuerzo nominal se calcula bajo la suposición de que el hormigón es un material elástico, y dado que este esfuerzo de flexión está localizado en la superficie exterior, éste tiende a ser mayor que la resistencia del hormigón en tracción axial uniforme. Este esfuerzo es entonces una medida de la resistencia a la tracción axial real pero no es idéntica a ella.

Suelen requerirse pruebas a la flexión en vigas cuando hormigón no reforzado va a quedar sujeto a carga de flexión, como es en el caso de los pavimentos de carreteras.

3) MÉTODO DE ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA, (TENSIÓN HENDEDORA O ENSAYO BRASILEÑO) (NB 641)(ASTM C496)

De los ensayos de resistencia a tracción el más sencillo de efectuar es el ensayo de tracción indirecta. Este no da resultados idénticos a la resistencia a la tracción axial real, pero se considera que son una buena medida de la verdadera resistencia a la tracción del hormigón. El ensayo consiste en la aplicación de la carga sobre 2 generatrices diametralmente opuesta, como se muestra en la figura 12.10.

- a) Las probetas utilizadas para este ensayo son de iguales características que las utilizadas en el ensayo de compresión. La máquina será la misma que la utilizada para el ensayo a la compresión. Se necesita una barra suplementaria de apoyo cuando el bloque inferior de apoyo o la cara superior

de apoyo son menores que la longitud del cilindro que se va a probar, de tal manera que la carga se aplique sobre la longitud completa del cilindro.

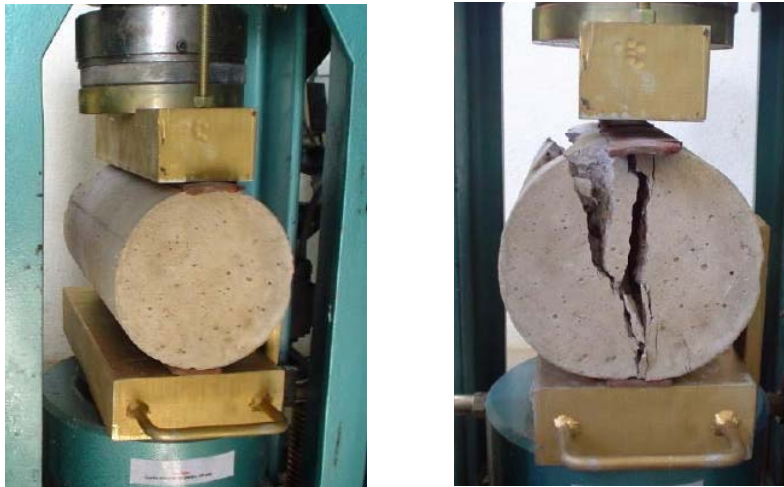


FIGURA 12.10 Ensayo de la tensión hendedora

(Laboratorio COBOCE HORMIGÓN, Cochabamba)
Fuente: Propia

- b) Durante la prueba, se colocarán dos listones de apoyo de madera contrachapada con espesor de 3mm, un ancho aproximado de 25mm y una longitud igual a la del cilindro, o ligeramente mayor que ésta, adyacentes a la parte superior e inferior de la muestra. Los listones de apoyo no se volverán a utilizar.
- c) El cálculo de la resistencia a la tracción indirecta de la muestra se hará como se indica a continuación

$$f_{ti} = \frac{2P}{\pi \cdot l \cdot d}$$

en donde

f_{ti} = resistencia a la tracción indirecta, MPa

P = carga máxima aplicada, indicada por la máquina de pruebas, N

l = longitud, mm

d = diámetro, mm

12.3.1.1.5. EQUIVALENCIAS ENTRE LOS DISTINTOS ENSAYOS MECÁNICOS DE PROBETAS ENMOLDADAS

No es posible establecer con carácter general unos coeficientes de equivalencia entre unos ensayos y otros, porque las relaciones varían de uno a otro hormigón. Por ello, sólo pueden darse unos valores medios de carácter orientativo.

Ahora bien, para un hormigón determinado que se esté fabricando bajo las mismas condiciones esenciales, puede determinarse, mediante ensayos, cualquier coeficiente de equivalencia que resulte conveniente conocer. **No obstante, en el control de calidad de obras de hormigón, no deben tomarse decisiones de aceptación o rechazo basadas en coeficientes de equivalencia.**

1. Equivalencia entre distintas formas de probetas

- En los ensayos de resistencia a compresión, cuando se utilizan probetas diferentes de la cilíndrica de 15 x 30, los resultados obtenidos en el ensayo deben multiplicarse por el coeficiente de conversión dado en la tabla 12.5, para obtener el valor que correspondería a la probeta cilíndrica 15 x 30cm.

TABLA 12.5. COEFICIENTES DE CONVERSIÓN RESPECTO AL ENSAYO A COMPRESIÓN EN PROBETA CILÍNDRICA DE 15 X 30 cm

Tipo de probeta (Con caras refrentadas)	Dimensiones (cm)	Coeficiente de conversión	
		Valores límites	Medio
Cilindro	15x30	-	1,00
	10x20	0,94 a 1,00	0,97
	25x50	1,00 a 1,10	1,05
Cubo	10	0,70 a 0,90	0,80
	15	0,70 a 0,90	0,80
	20	0,75 a 0,90	0,83
	30	0,80 a 1,00	0,90
Prisma	15 x 15 x 45	0,90 a 1,20	1,05
	20 x 20 x 60	0,90 a 1,20	1,05

Fuente: Referencia 2

- Quando se realiza un ensayo a Hendimiento sobre probeta diferente a la cilíndrica, o se realiza otra forma de ensayo de tracción, los resultados obtenidos deben multiplicarse por el coeficiente de conversión dado en la tabla 12.6, para obtener el valor que correspondería al ensayo de tracción indirecta.

TABLA 12.6. COEFICIENTES DE CONVERSIÓN RESPECTO AL ENSAYO A HENDIMIENTO EN PROBETA 15 x 30 cm.

Tipo de ensayo	Tipo de probeta y dimensiones (cm)	Coeficiente de conversión	
		Valores límites	Valor medio
Ensayo de tracción indirecta (tensión hendedora)	cilindro 15 x 30 cubo de 15 o 20	--	1.00
		0,91 a 1,16	1.03
Ensayo de flexión con cargas a los tercios de la luz	prisma de 10 x 10 prisma de 15 x 15	0,55 a 0,67	0.61
		0,61 a 0,74	0.67
Ensayo de flexión con carga centrada	prisma de 10 x 10 prisma de 15 x 15	0,53 a 0,61	0,57
		0,54 a 0,64	0,59
Tracción directa sobre probetas de esbeltez mayor que 2	prisma de 15 x 15 ó cilindro $\varnothing=15$	0,88 a 1,32	1,10

Fuente: Referencia 11

2. Equivalencia entre distintas edades

- En los ensayos de resistencia a compresión puede admitirse que la relación entre la resistencia a

“j” días de edad y la de 28 días, es la dada en la tabla 12.7. Un procedimiento completo, mas complicado, para predecir las resistencias a diferentes envejecimientos, se puede hallar en la ASTM C918.

TABLA 12.7. VALORES DE LA RELACIÓN f_{cj}/f_{c28}

Edad del hormigón, en días	3	7	28	90	360
Cemento Pórtland normal	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35
Cemento Pórtland de endurecimiento rápido (alta resistencia inicial)	0,55	0,75	1,00	1,15	1,20

Fuente: Referencia 2

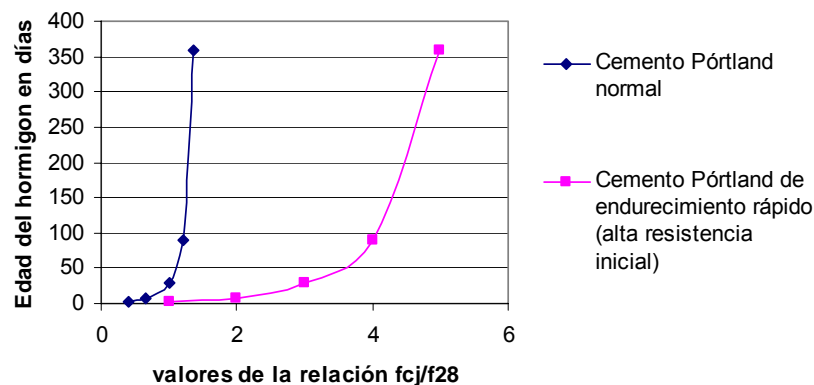


FIGURA 12.11 Valores de la relación f_{cj}/f_{c28}

Fuente: Referencia Propia

- En los ensayos de resistencia a tracción, la relación citada puede tomarse de la tabla 12.8.

TABLA 12.8. COEFICIENTES DE CONVERSIÓN RESPECTO A 28 DÍAS DE EDAD, EN LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

Edad del hormigón, en días	3	7	28	90
Tracción directa	0,58	0,74	1,00	1,22
Ensayo tracción indirecta	0,65	0,78	1,00	1,08
Ensayo de flexotracción	0,58	0,75	1,00	1,20

Fuente: Referencia 11

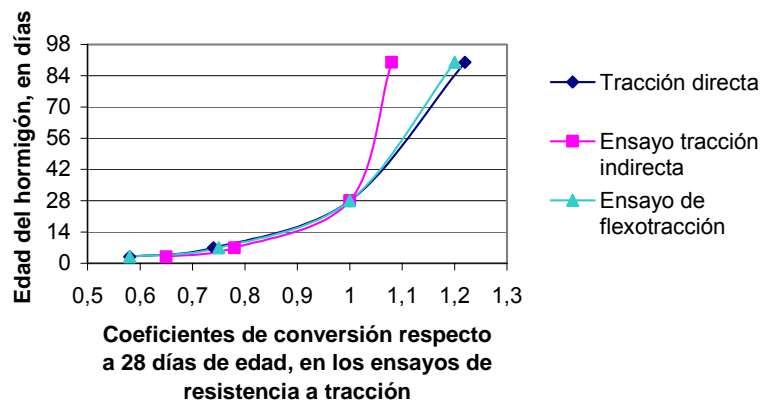


FIGURA 12.12 Coeficientes de conversión respecto a 28 días de edad, en los ensayos de resistencia a tracción.

Fuente: Referencia Propia

12.3.1.1.6. EXTRACCIÓN Y ENSAYO DE PROBETAS TESTIGO (NB 635; ASTM C42)

1. Generalidades

Cuando sea necesario determinar la resistencia del hormigón correspondiente a una obra ya ejecutada, pueden obtenerse probetas talladas directamente de la obra.

Generalmente, las probetas se extraen mediante perforadoras tubulares, con las que se obtienen testigos cilíndricos cuyas caras extremas se cortan posteriormente con disco. A veces se emplean también cubos cortados del elemento en cuestión; pero la perturbación que introduce el corte, generalmente es mayor que la del taladro, lo que conduce a menores resistencias, especialmente en hormigones con bajo contenido de cemento.

Un valioso auxiliar en la técnica de extracción de probetas es el *detector magnético de armaduras*, también llamado *Pacómetro* (figura 12.13), aparato que, aplicado a la superficie del hormigón, permite localizar la presencia y la orientación de las armaduras o cables pretensados hasta profundidades del orden de los 10 cm, determinar el tamaño de las barras así como el espesor del recubrimiento. De este modo, se evita cortar armaduras al proceder al sondeo.

2. Dimensiones de las Probetas

Cuando se trate de probetas cilíndricas destinadas al ensayo de compresión, es recomendable que su diámetro sea igual o mayor de 10 cm, y que su altura sea por lo menos el doble del diámetro. Por otra parte, para que la probeta sea representativa, su diámetro no debe ser inferior al triple del tamaño máximo del árido.

Es conveniente que las probetas no se extraigan antes de los 28 días.

**FIGURA 12.13** PacómetroFuente: www.ndtjames.com

3. Preparación y Conservación de las Probetas Testigo.

Las bases de las probetas cilíndricas destinadas al ensayo de compresión deben refrentarse con mortero de azufre. La longitud de la probeta, ya refrentada, se medirá con una precisión mínima de 1,0 mm; y el diámetro se determinará como la media de las medidas tomadas en dos diámetros perpendiculares, en puntos en donde la sección sea mínima y con un error no mayor de 0,1 mm.

En el caso en que la obra o estructura de la que se han extraído las probetas vaya a estar sometida a humedad continuamente, o a saturación de agua, las probetas talladas y refrentadas deben mantenerse, antes del ensayo, durante 40 a 48 horas en agua, a la temperatura de 20 ± 2 °C. En caso contrario se mantendrán al aire, en el ambiente del laboratorio, durante el mismo tiempo. La conservación en agua conduce a valores de rotura del orden del 15% menores que los valores obtenidos cuando la conservación se realiza al aire.

El ensayo de rotura a compresión se efectúa de acuerdo con la Norma NB 639, debiendo especificarse la forma de conservación de las probetas y los puntos de la obra de donde han sido extraídas.

4. Evaluación de la Resistencia

En cuanto a la influencia de la edad, está ligada fundamentalmente al tipo de cemento. Si se deseara estimar la resistencia a otra edad distinta de la ensayada, habría que utilizar correlaciones específicas para cada cemento.

Es relativamente frecuente que los testigos de hormigón contengan algún trozo de barra de acero en

su interior, en dirección perpendicular al esfuerzo de compresión. Es lógico suponer que su presencia puede disminuir el resultado obtenido en el ensayo, pero parece demostrado que este efecto no llega al 5%, siendo, por tanto, despreciable.

12.3.1.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos tienen por objeto conocer la calidad del hormigón en obra, sin que resulte afectada la pieza o estructura objeto de examen. En particular, el progreso de las técnicas electrónicas ha contribuido decisivamente al grado de precisión de los resultados que hoy día se obtienen.

Existe una gran variedad de métodos de ensayo no destructivos, pero todos ellos van encaminados a determinar ciertas características del hormigón (dureza, módulo de elasticidad, densidad, grado de humedad, etc.) que, a veces, permiten obtener una estimación orientativa de la resistencia del hormigón. Los más importantes y mejor desarrollados en la actualidad pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- Métodos esclerométricos.
- Métodos por velocidad de propagación.
- Métodos por resonancia.
- Métodos mixtos.
- Métodos por absorción o difusión de radio-isótopos.

de cada uno de los cuales haremos una ligera reseña.

La norma boliviana no tiene ninguna especificación sobre este tipo de ensayos, por lo que en caso de necesitar mas información se sugiere revisar la especificación ACI-228.1R y ACI-228.2R donde se encuentran, entre otros, los ensayos que se mencionan a continuación.

12.3.1.2.1. MÉTODOS ESCLEROMÉTRICOS

Los métodos esclerométricos constituyen ensayos elementales que determinan la dureza superficial del hormigón, bien mediante la energía residual de un impacto sobre la superficie del hormigón (medición de un rebote), bien mediante la huella que deja una bola al chocar con dicha superficie, o bien midiendo la profundidad de penetración de un clavo.

Por otra parte, cuando la superficie de la pieza de hormigón es más dura que el interior de la misma (lo que sucede por carbonatación, (ver apartado 9.4.4), los métodos esclerométricos resultan

inseguros, al arrojar valores de resistencia superiores a los reales. De ahí que no sea recomendable su empleo en estructuras con muchos años de edad.

Para realizar estos ensayos existen varios tipos de aparatos, denominados *esclerómetros*, entre los que podemos señalar los siguientes:

1. *El martillo Schmidt (ASTM C 805)* (figura 12.14), mide la dureza superficial del hormigón en función del rechazo de un martillo ligero, constituido por un pequeño cilindro macizo de acero, al hacerlo chocar con la superficie de la pieza. Puede resultar útil para determinar la marcha del endurecimiento del hormigón, o para comparar su calidad entre distintas zonas de una misma obra, pero no para controlar la resistencia del hormigón, debido a que la dispersión de las distintas determinaciones es bastante grande y, además, la parte ensayada afecta a una capa superficial de poco espesor.

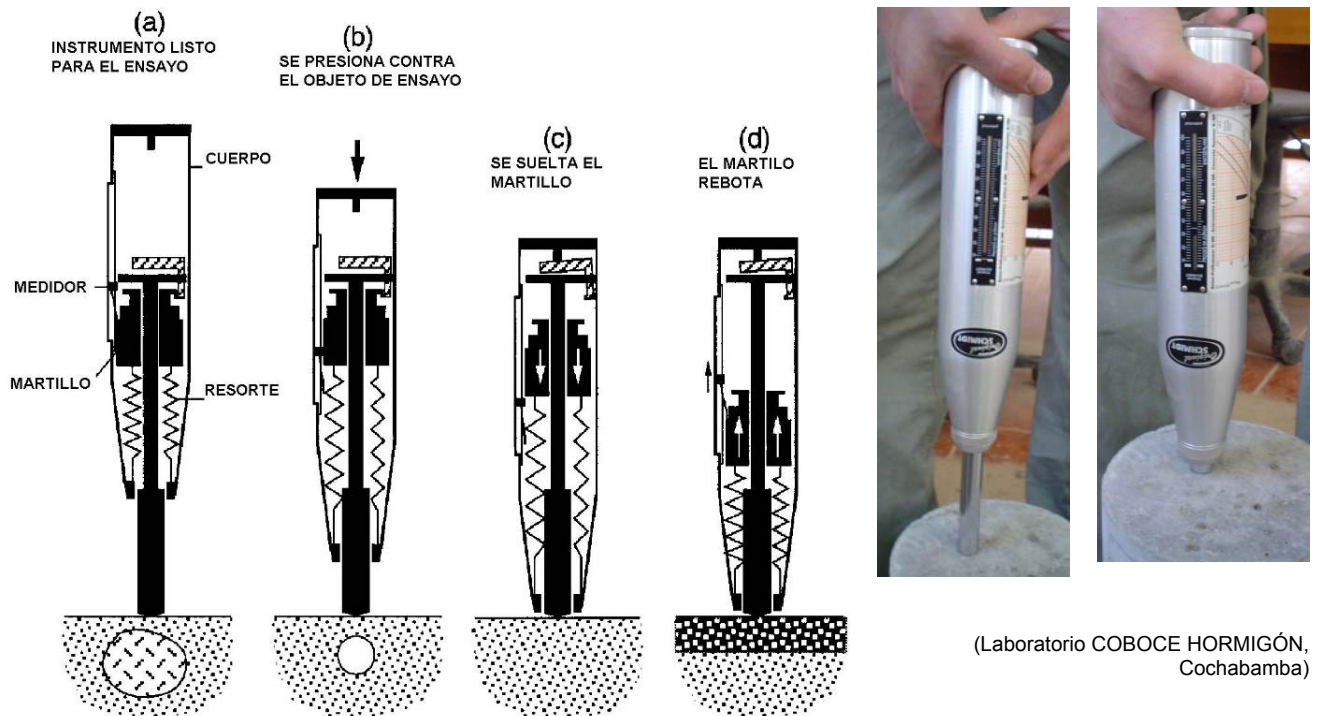


FIGURA 12.14 El martillo de Shmidt. A la izquierda una ilustración esquemática, a la derecha el ensayo sobre una probeta cilíndrica

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 9 y Propia

- (a) Procedimiento: Sostener el instrumento firmemente de modo que el émbolo este perpendicular a la superficie de prueba. Empujar gradualmente el instrumento hacia la superficie de prueba, hasta que el martillo impacte. Después del impacto, mantener la presión en el instrumento y, en caso de necesidad, presionar el botón a lado del instrumento para trabar el émbolo interno, en su posición contraída. Aproximar el número de rebotes en la escala, al número entero más cercano y registre el número de rebote. Tomar diez lecturas de cada zona de pruebas. Dos pruebas de

impacto no podrán estar más cercanas que 25 milímetros. Examinar la impresión hecha en la superficie después del impacto, y si el impacto machaca o rompe por la cercanía a una bolsa de aire, descarte la lectura y tomar otra nueva.

- (b) Calculo: Descartar lecturas que difieran por mas de 6 unidades del promedio de 10 lecturas y determinar el promedio de las lecturas restantes. Si más de 2 lecturas difieren del promedio por más de 6 unidades, descartar el grupo entero de lecturas, y determinar números de rebote en otros 10 lugares dentro de la zona de ensayo.
2. *El martillo Frank* mide la dureza superficial del hormigón por el diámetro de la huella que deja impresa una bola de acero sobre la que se da un golpe. Como en el caso anterior, los resultados no tienen gran precisión, por lo que sólo debe emplearse para obtener una idea de la calidad del hormigón o de la marcha del endurecimiento del mismo.
3. *Esclerómetro Windsor*. ASTM 803 (figura 12.15). Se basa en aplicar a la superficie del hormigón una especie de clavo de acero extraduro que se introduce en el material por medio de una carga explosiva. Lo que se mide es la profundidad de penetración, que viene relacionada con la resistencia a compresión del hormigón. Se afirma que la reproducibilidad de las medidas es grande y que el ensayo es aplicable a superficies planas y curvas, losas de pequeño espesor, etc., lo cual representa, sin duda, una ventaja respecto al martillo Schmidt.

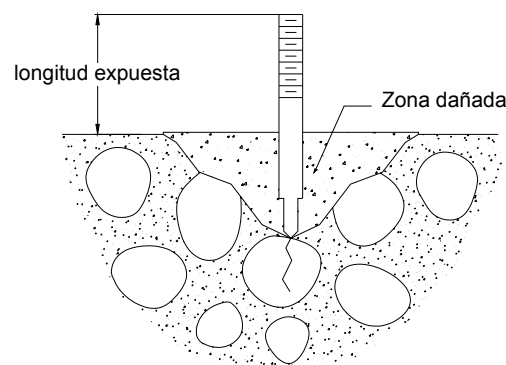


FIGURA 12.15 Forma Aproximada de la zona de falla en el hormigón durante ensayo de penetración
Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 9

12.3.1.2.2. MÉTODOS POR VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN

Estos métodos consisten en generar ondas que se propagan en un sólido elástico y medir su velocidad de propagación dentro de este. Esta velocidad dependerá del modulo de elasticidad, relación de Poisson, la densidad y la geometría del elemento.

Estos métodos se pueden utilizar para localizar regiones defectuosas en un miembro como ser vacíos, cangrejeras o laminaciones; también pueden ser utilizados para medir el espesor de un elemento, profundidad de fundaciones (pilotes), módulo elástico, dureza, etc.

12.3.1.2.3. MÉTODOS POR RESONANCIA (ASTM C-215)

Utilizados para determinar la calidad del hormigón, están basados en la relación existente entre la frecuencia de resonancia de una pieza y las constantes elásticas del material.

Estos ensayos presentan el inconveniente de que han de efectuarse sobre probetas o piezas de pequeñas dimensiones.

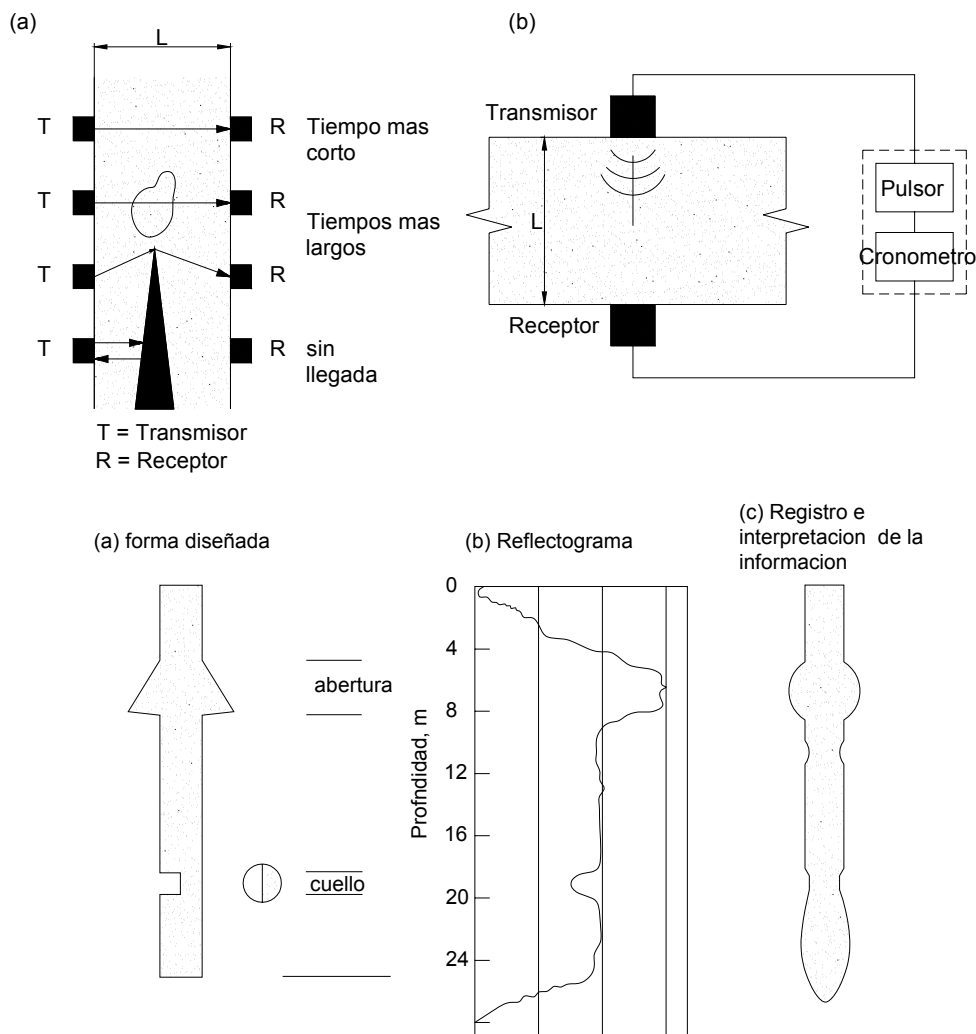


FIGURA 12.16 a) Efectos de los defectos en el tiempo de viaje de un pulso ultrasónico; (b) un esquema del sistema de transmisión del ensayo. (c) defectos planeados en un pilote experimental; (d) reflectograma obtenido del procesamiento de señales eco-sonicas; y (f) Registro de impedancia obtenido de la combinación de información del reflectograma y experiencias anteriores.

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 10

Si en una probeta o pieza de hormigón se logra excitar una vibración, cuya frecuencia coincida con su frecuencia propia o de resonancia, pueden determinarse las constantes elásticas del material, en donde se encuentra la marcha a seguir para efectuar el ensayo.

Una vez determinadas las frecuencias de resonancia, pueden calcularse los módulos de elasticidad y rigidez dinámicos y, como consecuencia, el coeficiente de Poisson. Pero debe advertirse que estos valores dinámicos no coinciden con los correspondientes módulos estáticos del hormigón.

12.3.1.2.4. MÉTODOS COMBINADOS O MIXTOS

Cada uno de los métodos que acaban de ser expuestos posee sus propias limitaciones. Así, por ejemplo, los ensayos ultrasónicos pueden resultar poco precisos con hormigones de alta dosificación de cemento. Por su parte el esclerómetro puede conducir a errores considerables cuando la capa superficial del hormigón está excesivamente endurecida o cuando ha habido demasiada compactación.

Todo ello ha dado lugar a que se desarrollen métodos mixtos, combinando los anteriores, y creando correlaciones entre ellos, lo que conduce a una mayor precisión de las estimaciones de resistencia.

12.3.1.2.5. MÉTODOS NUCLEARES

Se dividen en métodos Radiométricos y métodos Radiográficos.

Los métodos *Radiométricos* se utilizan para calcular la densidad del hormigón fresco o del endurecido midiendo la cantidad de rayos gama que pasan a través del hormigón, o que regresan después de rebotar en la cara opuesta.

Los métodos *Radiográficos* son idénticos a los rayos X comunes, utilizados en medicina. Con esta radiografía se pueden localizar la posición de las armaduras, vacíos internos y vacíos en la lechada en miembros postensados.

12.3.1.2.6. OTROS MÉTODOS

TABLA 12.9. PROCEDIMIENTOS PARA ESTIMAR LA CALIDAD DEL HORMIGÓN DE UNA ESTRUCTURA

Procedimiento	Forma de trabajo	Característica que se determina
Análisis químico.	Determinación del contenido en cal o sílice, sobre una muestra de 5 kg de hormigón. Otros métodos.	Dosis de los componentes. Relación agua/cemento.
Extracción de probetas testigo.	Sonda rotatoria y ensayos posteriores.	Resistencia, Peso específico, Porosidad, Módulo de elasticidad dinámico, Las del caso anterior.
Exploración esclerométrica.	Estimación de la dureza superficial (índice esclerométrico).	Resistencia.
Exploración con ultrasonidos.	Medida de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas.	Módulo de elasticidad. Resistencia. Presencia de fisuras.
Detección magnética de armaduras.	Medición de variaciones en campos magnéticos, con el pacómetro.	Posición de las armaduras. Espesor del recubrimiento.
Rayos X.	Inspección radiográfica.	Posición de las armaduras y vacíos en el hormigón.
Isótopos radioactivos (radiometría).	Medición de la absorción, difusión o presencia de radio-isótopos.	Peso específico, Porosidad, Cangrejeras, Contenido en agua, Posición y diámetro de las armaduras.
Examen al microscopio.	Sobre el propio elemento.	Presencia de fisuras.
Análisis petrográfico.	Sobre muestras extraídas.	Posibles alteraciones (precipitación, carbonatación, etc.)
Recuento microscópico.	Método de las líneas transversales sobre muestra preparada.	Aire ocluido.
Pruebas de carga.	Medición de deformaciones y fisuras.	Comprobación del comportamiento elástico.

Fuente: Referencia 11

Métodos Magnéticos y Eléctricos.- Se utilizan para conocer la cantidad y estado de las barras de acero en un elemento y estimar el espesor del recubrimiento.

Método de Penetrabilidad.- Determina la capacidad de la capa externa del elemento para resistir el ingreso de sustancias agresivas.

Método de Termografía Infrarroja.- Identifica zonas defectuosas como rajaduras, vacíos, laminaciones, etc.

Los resultados que se obtienen de todos estos ensayos, incluidos los de probetas testigo, deben interpretarse de manera juiciosa, puesto que ninguno puede traducirse directamente a términos de resistencia normalizada sobre probetas enmoldadas, que es en definitiva la que sirve de base a los cálculos y a los Pliegos de Condiciones.

12.4. OTROS ENSAYOS

- Método o prueba para determinar la eficacia de los aditivos minerales para evitar la expansión excesiva del hormigón debida a la reacción álcali-agregado, ASTM C441.
- *Tiempo de fraguado*. Método de prueba para el tiempo de fraguado de mezclas de hormigón por resistencia a la penetración; ASTM C403.
- Muestras para pruebas a la compresión y flexión del hormigón, fabricación y curado en el laboratorio; ASTM C192.
- *Resistencia a la congelación y el deshielo*. Sería aplicable cualquiera de los dos métodos siguientes de prueba: ASTM C290-61T o C291-61T.
- *Cambio de volumen*. Método de prueba para el cambio de volumen del mortero y hormigón de cemento; ASTM C157.

BIBLIOGRAFIA

1. NB 639:1994 Hormigón - Rotura por Comprensión.
2. CBH 87 Norma Boliviana del Hormigón Armado.
3. ASTM C1170-91(1998) Standard Test Methods for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table.
4. ASTM C143M-03 Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete.
5. ASTM C31M-03 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.
6. ASTM C78-02 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).
7. ASTM C39M-03 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
8. ACI 211.3R-02 Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete.
9. ACI 228.1R-95 In-Place Methods to Estimate Concrete Strength.
10. ACI 228.2R-98 Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.
11. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". 14ª ed., Gustavo Gili, SA, Barcelona.
12. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) "Manual de la Construcción con Concreto". 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
13. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

V

PUESTA EN
OBRA

CAPITULO 13

ENCOFRADOS

13.1. OBJETIVOS BÁSICOS

La misión del encofrado es contener y soportar el hormigón fresco hasta su endurecimiento, sin experimentar asentamientos ni deformaciones, dándole la forma deseada. Los encofrados deben ser diseñados de modo que los elementos de hormigón tengan las dimensiones, forma, alineación, elevación y posición correctas dentro de las tolerancias establecidas. También debe diseñarse de modo que soporte con seguridad todas las cargas verticales y laterales que pudieran ser aplicadas y transmitir las al suelo, hasta que tales cargas puedan ser soportadas por la estructura de hormigón.

13.2. DEFINICIONES

13.2.1. CLASIFICACION DEL ENCOFRADO

Encofrado.- Sistema de apoyo para hormigón fresco, incluyendo el molde en contacto con el hormigón, así como todos los miembros de soporte.

Encofrado autoportante.- Grandes secciones prefabricadas de encofrado, diseñadas para múltiples reutilizaciones; con frecuencia incluyen celosía, viga, o puntales de soporte.



FIGURA 13.1 Encofrado Autoportante

Fuente: Referencia 5

Encofrado para hormigón vaciado en obra:

Encofrado Vertical: la presión predomina sobre las paredes verticales. Ejm. Encofrados unidos por tirantes, Pilas de puentes, muros, silos, etc.



FIGURA 13.2 Encofrado de muro unido por tirantes

Distribuidor de la Recoleta - Cochabamba
Fuente: Propia



FIGURA 13.3 Encofrado pila de puente.

Fuente: Referencia 5



FIGURA 13.4 Encofrado de silo.

Fuente: Referencia 5

Encofrado para Elementos de Gran Espesor: Los tirantes no atraviesan el hormigón. Ejm. Presas, Muros de subterráneos, esclusas, etc.

Encofrado Horizontal: La tensión principal corresponde al peso del hormigón. Ejm. Losas, Vigas, Vigas de puente, etc.



a)



b)

FIGURA 13.5 a) Encofrado de vigas de puente. b) Encofrado de losa.

Fuente: Referencia 5

Encofrado Especial: Ejm. Pilares, doble arco de curvatura, etc.



FIGURA 13.6 Encofrado de Pilar circular.

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia



FIGURA 13.7 Encofrados de doble arco de curvatura (Cimbras y Matrices).

Fuente: Referencia 5

Encofrado para elementos prefabricados:

Moldes para grandes extensiones planas: La resistencia del encofrado al peso o a la presión del hormigón es secundaria. Ejm. Tablas horizontales para losas prefabricadas.

Moldes donde aparece una flexión importante: domina la presión del hormigón. Ejm. Placas verticales de paredes delgadas.

Moldes para formas especiales: Ejm. Vigas de hormigón presforzado, viguetas, etc.



FIGURA 13.8 a) Encofrado de Viga preesforzada
Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia

13.2.2. PARTES DEL ENCOFRADO

Puntales.- Miembros de soporte, verticales o inclinados, diseñados para soportar el peso del encofrado, del hormigón, y de la cargas de construcción encima.



a)



b)

FIGURA 13.9 a) Puntales de madera b) Puntales metálicos.
Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba

Fuente: a) Propia b) Referencia 5

Andamios.- Plataforma temporal elevada (apoyada o suspendida) y su estructura de soporte usada para resistir trabajadores, herramientas, y materiales.



FIGURA 13.10 a) Andamios metálicos.

Fuente: Referencia 5

Arriostramiento Diagonal.- Miembros complementarios del encofrado diseñados para resistir cargas laterales.



FIGURA 13.11 a) Arriostramiento diagonal.

Distribuidor de la Recoleta - Cochabamba
Fuente: Propia.

Una mejor comprensión de los elementos del encofrado es mediante la observación gráfica de estos, como se ilustrara en la figura 13.12.

13.3. GENERALIDADES

Los encofrados se fabrican de diferentes materiales, y el método de diseño dependerá del material.

En la tabla 13.1 se muestran los diferentes materiales para encofrado que se usan en la actualidad.

Generalmente son de madera o metálicos, exigiéndoseles como cualidades principales las de ser rígidos, resistentes, herméticos y limpios. Los de madera deben humedecerse antes de la colocación del hormigón, para que no absorban el agua de éste y debe ser fácil de procesar, de baja densidad, fácil de clavar y que no demore el fraguado del hormigón; entre las maderas utilizadas en nuestro medio tenemos: Bibosi, Ochoo, Pacay, Palo Zapallo, Serebo, Tachore, Yuruma, etc.

Las superficies interiores de los encofrados deben estar limpias en el momento del vaciado.

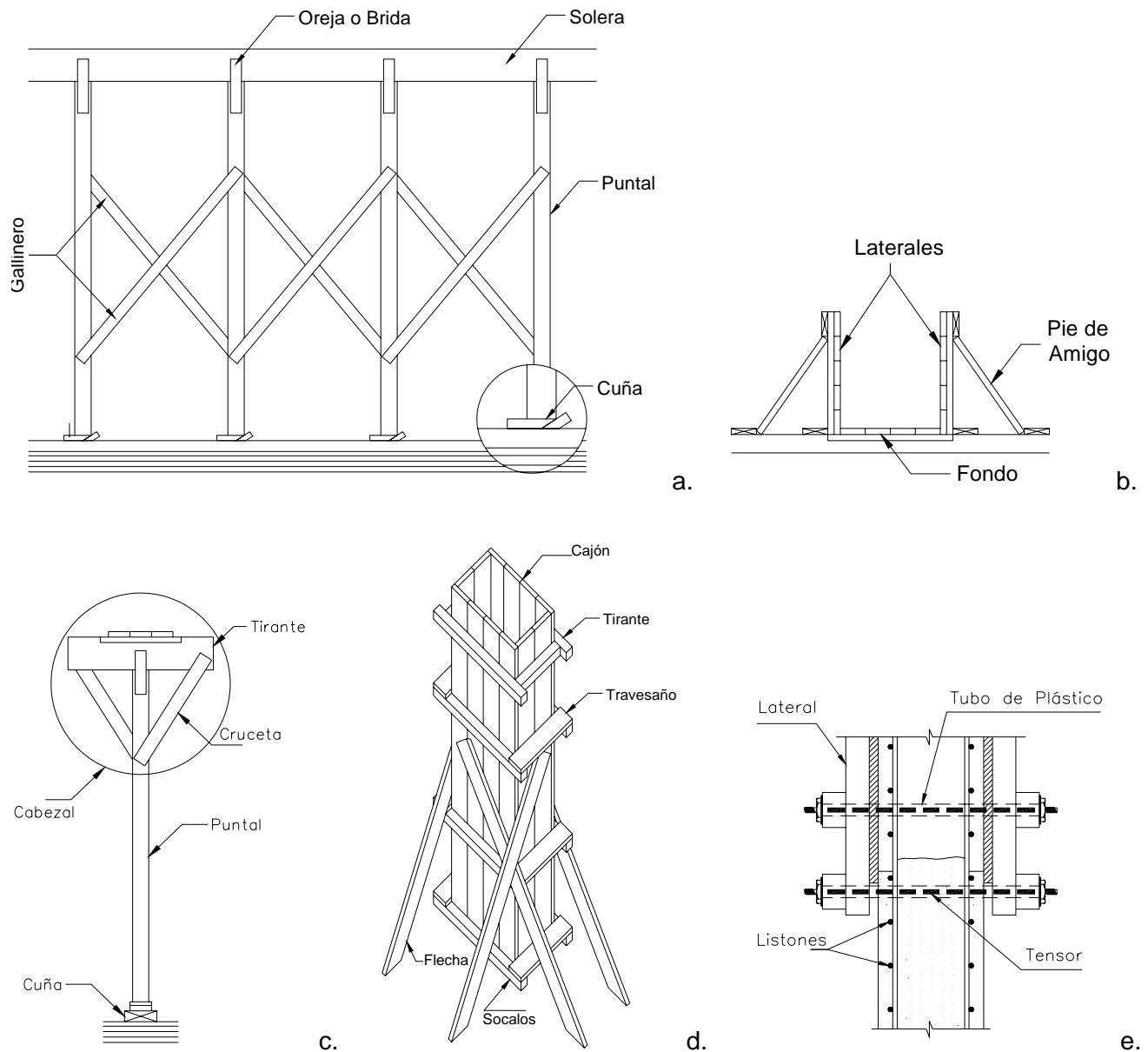


FIGURA 13.12 Elementos del encofrado. **a.** apuntalado, **b.** encofrado viga, **c.** detalle del puntal, **d.** encofrado de columna rectangular, **e.** encofrado de muro.

Fuente: Elaboración Propia

En elementos de gran luz, conviene disponer en los encofrados la oportuna contraflecha para que, una vez desencofrada y cargada la pieza de hormigón, ésta conserve una ligera concavidad en su cara inferior. En general, la contraflecha no es necesaria para luces menores de 6m.

Se debe planificar bien antes empezar la construcción; diseñándose a resistencia y a serviciabilidad. Se debe realizar un análisis para determinar las cargas transmitidas a los pisos y puntales como resultado de la secuencia de construcción y para determinar el número de pisos que se apuntalarán o reapuntalaran. Esta condición se explicará a continuación.

TABLA 13.1 ALGUNOS MATERIALES PARA ENCOFRADO.

Material	Uso Principal
Madera Aserrada	Estructura del encofrado, entablado y apuntalado.
Madera Contrachapada	Entablado y paneles.
Acero	Estructura de paneles y arriostramientos.
	Encofrados macizos y andamios
	Columnas y encofrado de viguetas
	Apuntalado
	Encofrado permanente de losa
Aluminio	Viguetas de acero usadas como apuntalado horizontal.
	Paneles de encofrado y miembros de la estructura del encofrado.
Productos de paneles de madera reconstituida.	Apuntado y arriostramiento horizontal y vertical
Materiales de aislamiento.	Planchas de relleno y entablados.
<ul style="list-style-type: none"> Fibras de madera o fibra de vidrio Otros productos comerciales. 	Encofrado con planchas de relleno o entablado.
Tubos o encofrados de papel prensado de fibras o laminado.	Protección para tiempo frío para el hormigón fresco
Cartón corrugado.	Encofrado de vigas o columnas.
	Encofrado hueco para losas, vigas y pilotes prefabricado.
Hormigón	Encofrados huecos para dentro y/o debajo losas.
	Encofrados huecos en vigas.
	Encofrados permanentes.
	Moldes para unidades prefabricadas.

Fuente: Referencia 1

13.3.1. APUNTALADO Y REAPUNTALADO DE ESTRUCTURAS DE VARIOS PISOS

Apuntalado.- Consiste en colocar puntales para soportar el encofrado y el hormigón fresco, hasta que el encofrado sea retirado.

Reapuntado.- El reapuntado se realiza para poder retirar y reutilizar el encofrado, lo que supone un ahorro en la economía. Consiste en acomodar puntales debajo de una losa o elemento de hormigón después de haberlo desencofrado. Esto requiere que, antes del reapuntado, primero el nuevo elemento estructural se haya deflectado y soporte su peso propio y las cargas existentes de construcción aplicadas; esto para que estas cargas no se transmitan a los pisos inferiores. Se asume que estos puntales no soportan cargas al momento de la instalación. Luego, las cargas de construcción posteriores serán distribuidas a través de todos los miembros conectados por los puntales.

Los puntales en los que se apoya el hormigón recién vaciado, son soportados por los pisos inferiores que pueden no estar diseñados para soportar estas cargas. Por esta razón el apuntalamiento o el reapuntamiento se debe mantener en el suficiente número de pisos para distribuir las cargas de construcción impuestas a losas de varios niveles sin causar tensiones ni deformaciones excesivas.

Los puntales no deben estar ubicados de manera que alteren el patrón de esfuerzos determinado en el análisis estructural o que induzcan esfuerzos de tracción en donde no se dispuso de barras de refuerzo para este fin (fig. 13.13).

En lo posible, los puntales se deben situar en la misma posición en cada piso de modo que el soporte sea continuo de piso a piso. La figura 13.13, muestra un ejemplo de lo que podría suceder si esto no se hace de esta manera.

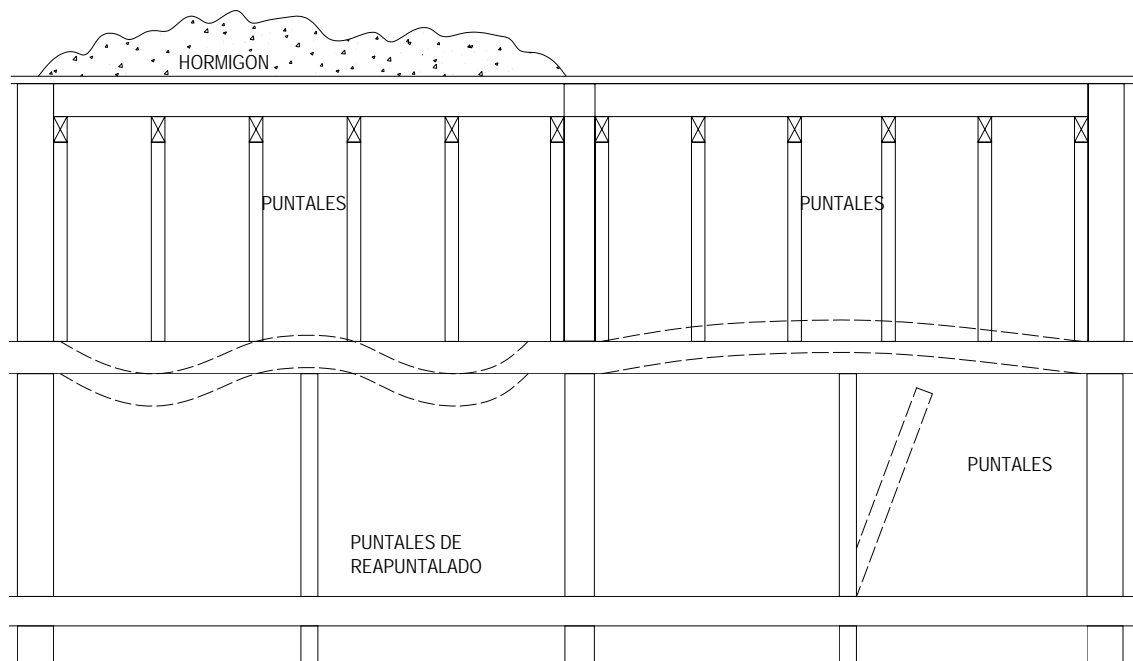


FIGURA 13.13 Reapuntalado. Inapropiada posición de puntales de piso a piso puede crear esfuerzos de flexión para los cuales no está diseñada la losa.

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 1

13.4. DEFICIENCIAS EN EL ENCOFRADO

Algunas deficiencias frecuentes de diseño que pueden conducir a la falla son:

- No considerar en el diseño cargas como viento, equipo de vaciado y almacenaje temporal de material.
- Reapuntalado inadecuado
- Reapuntalado sobrecargado.
- Precauciones inadecuadas para prevenir la rotación del encofrado de la viga cuando la losa llega solamente por un lado (figura 13.14).
- No considerar las cargas excéntricas generadas por la secuencia de vaciado (figura 13.13).
- Falla al proporcionar el apoyo lateral apropiado para el apuntalamiento.

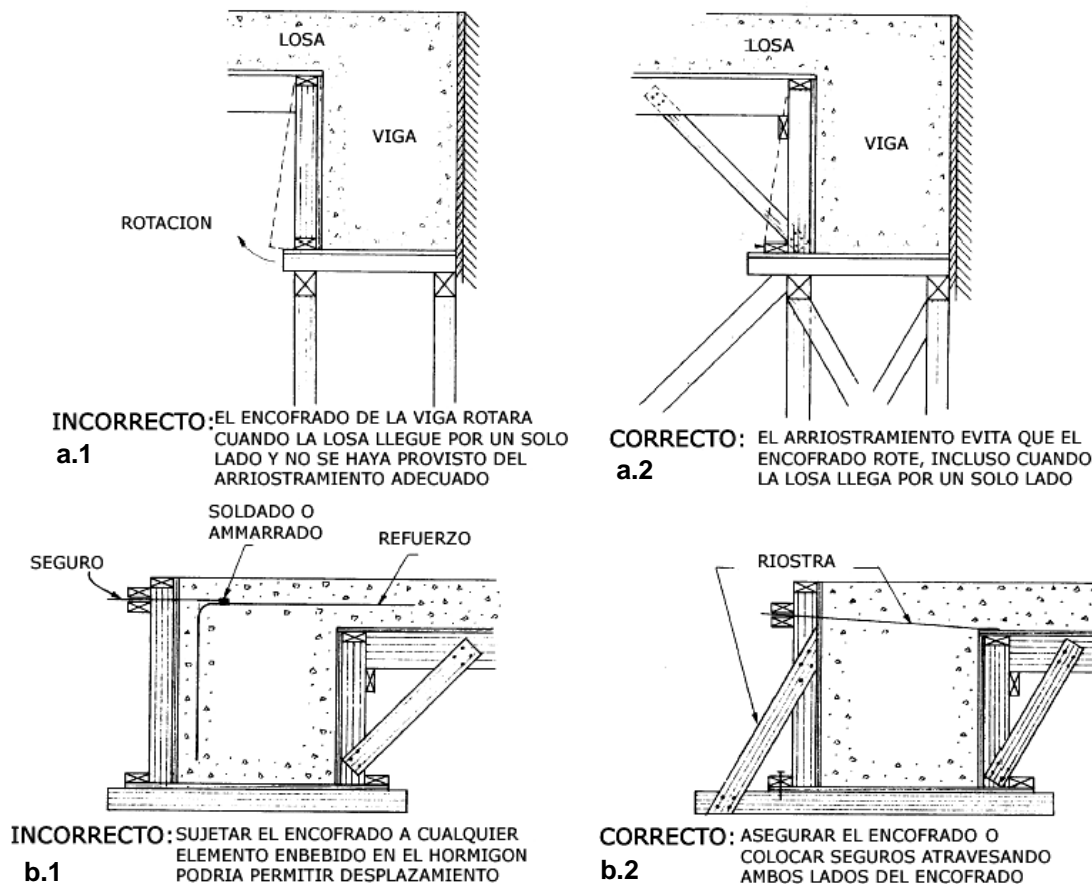


FIGURA 13.14 La prevención de rotación es importante cuando la losa llega a la viga solo por un lado.

Fuente: Referencia 1

13.5. CARGAS SOBRE EL ENCOFRADO

La carga o fuerzas aplicadas sobre un encofrado que deben ser consideradas por el diseñador, se clasifican en carga viva y carga muerta. La carga viva es el peso de los trabajadores y equipo y otras cargas temporales que son soportadas por el encofrado durante el vaciado y acabado del hormigón, como por ejemplo material almacenado. La carga muerta consiste en el peso del propio encofrado más el del hormigón y el acero de refuerzo.

Cuando el hormigón se vacía en los encofrados, se encuentra en un estado semilíquido, por lo que ejerce una presión hidrostática sobre las superficies que lo confinan, de la misma manera que lo hace cualquier líquido. Debido a esto, la presión en todas direcciones, en cualquier punto dado, se calcula igual que para cualquier líquido.

Conforme el hormigón se endurece, cambia de un estado líquido a sólido, con lo que se elimina la presión lateral. *El hormigón endurece más rápido en tiempo cálido que en tiempo frío (suponiendo que no existe un aditivo retardador en el hormigón).*

Muchos otros factores pueden influir sobre la presión del hormigón sobre los encofrados, incluyendo el tipo de vibración que se aplique para consolidarlo (vibración externa o vibración interna), la carga de impacto causada por la caída libre del hormigón cuando se vacía hacia adentro del encofrado o sobre éste y el revenimiento del hormigón. La ACI 347 ha desarrollado fórmulas que pueden utilizarse para calcular las presiones laterales ejercidas por el hormigón fluido sobre los encofrados de muros y columnas. En estas fórmulas se toman en consideración los muchos factores variables que intervienen.

13.6. RETIRO DE ENCOFRADOS Y SOPORTES

Aunque el contratista es generalmente el responsable del diseño, construcción y la seguridad del encofrado, los criterios para el retiro de estos deben ser especificados por el ingeniero.

13.6.1. RECOMENDACIONES

- El ingeniero debe especificar la resistencia mínima que debe alcanzar el hormigón antes del retiro del encofrado y puntales. La resistencia puede determinarse por pruebas con probetas cilíndricas o ensayos no destructivos sobre los elementos de hormigón.
- Dependiendo de las circunstancias, se puede establecer un tiempo mínimo después de la colocación del hormigón para el retiro del encofrado. La determinación de este tiempo se basa en el efecto resultante del desencofrado sobre el hormigón.
- Cuando el encofrado es retirado no debe haber excesiva deflexión o distorsión y ninguna evidencia de daño al hormigón debido al retiro del encofrado o a las operaciones de retiro (figura 13.15).
- Cuando se retira el encofrado antes de que se termine el curado, se deben tomar medidas para continuar este y proporcionar la protección térmica adecuada para el hormigón.
- El encofrado y los puntales portantes, no se deben quitar de las vigas, pisos y paredes hasta que estos elementos estructurales sean lo suficientemente resistentes para soportar su peso propio y cualquier otra carga aplicada. En ningún caso el encofrado y los puntales deben ser quitados de elementos horizontales antes de que la resistencia del elemento haya alcanzado la resistencia específica especificada por el ingeniero.
- Como regla general, el encofrado en columnas puede quitarse antes que el encofrado en vigas y losas.

- Los encofrados y puntales deben ser contruidos de manera que puedan ser quitados con facilidad y seguridad sin causar impacto o choque al elemento y permitiendo al hormigón soportar su parte de la carga gradualmente y uniformemente.

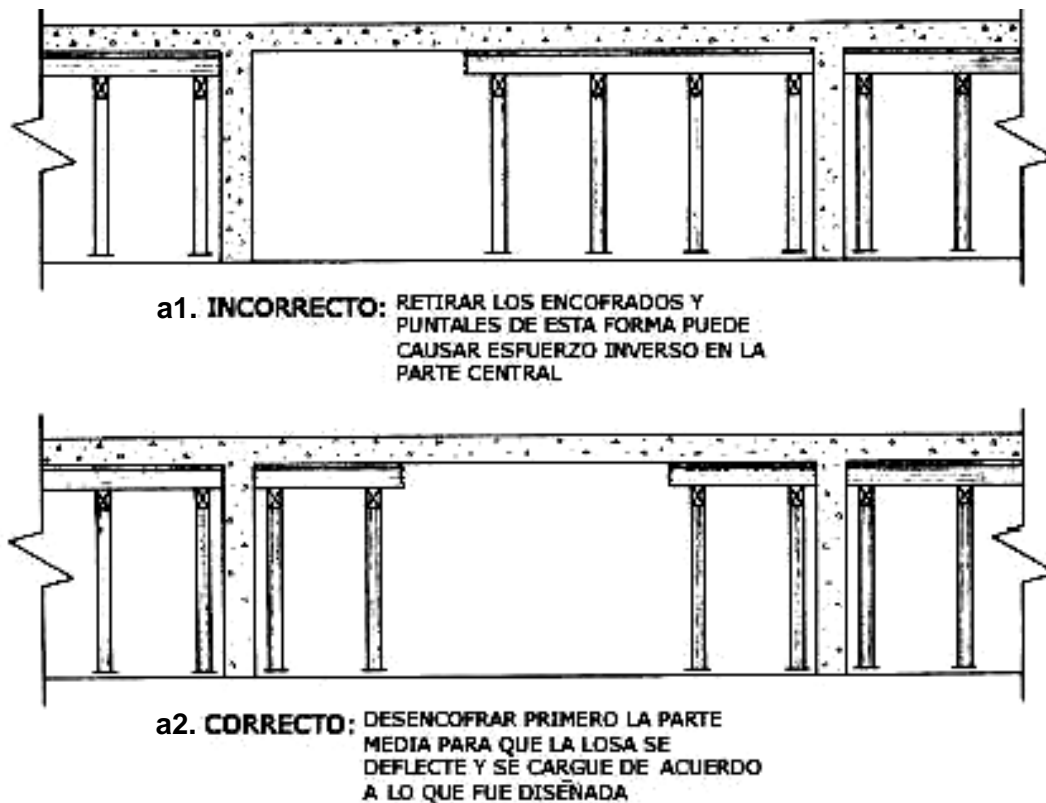
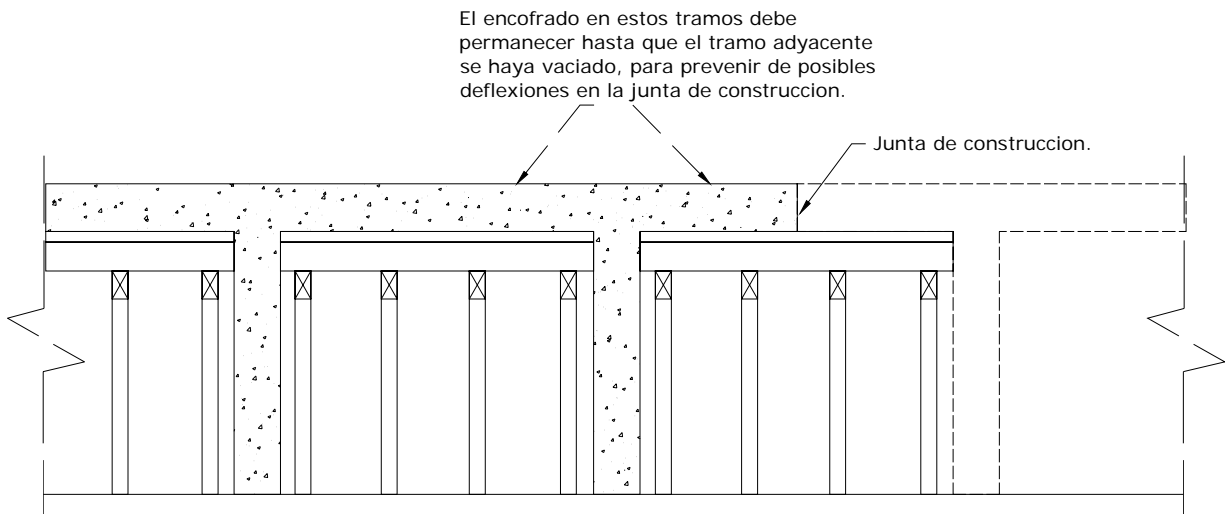


FIGURA 13.15 Secuencia de desencofrado para losas en dos direcciones

Fuente: Referencia 1

Cuando el ingeniero no especifica la resistencia mínima del hormigón, requerida al momento del retiro del encofrado, se pueden usar los tiempos de la tabla 13.2, los cuales representan el número acumulativo de días u horas, no necesariamente consecutivos, durante las cuales la temperatura ambiente que rodea el hormigón está arriba de los 10°C. Si se utiliza hormigón de alta resistencia inicial, estos períodos se pueden reducir previa aprobación del ingeniero. Inversamente, si la temperatura ambiente se mantiene debajo de 10°C, o si agentes retardadores de fraguado son utilizados, entonces estos períodos se deben aumentar a discreción del ingeniero.

**FIGURA 13.16** Encofrado y Apuntalado en juntas de construcción

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 1

13.6.2. DESENCOFRANTES (Resinas y Barnices)

En los últimos 25 años, se han desarrollado agentes desencofrantes químicos para hacerlos intensamente eficaces en la interfase entre el hormigón y el encofrado. Funcionan a través de una reacción química entre el álcali que se encuentra en el hormigón y los ácidos grasos contenidos en esos agentes

Tanto las superficies interiores de los encofrados como los productos desencofrantes que pueden aplicarse, deberán estar exentos de sustancias perjudiciales para el hormigón.

En nuestro medio se encuentran desencofrantes de la línea SIKA, como ser: Sikaform® Metal y Sikaform® Madera, su información técnica se presenta en el anexo 1. Además una práctica común en nuestro medio es la utilización de aceite sucio, aplicado con brocha uniformemente sobre el encofrado.

No se debe permitir los desencofrantes lleguen a las superficies dejadas para las juntas de construcción, ni a las barras de refuerzo, porque afectaran a la adherencia.

TABLA 13.2 NÚMERO ACUMULATIVO DE DÍAS U HORAS PARA EL DESENCOFRADO[£].

Muros *	12h		
Columnas *	12h		
Lados de vigas *	12h		
moldes para losas nervadas+			
De	760 milímetros de ancho o menos	3 días	
mayor	a 760 mm de ancho	4 días	
		Carga viva menor que carga muerta	Carga viva mayor que carga muerta
centros de arco		14 días	7 días
vigueta, viga			
	luz libre Menor a 3m entre apoyos	7 días ++	4 días
	luz libre de 3 a 6m entre apoyos	14 días ++	7 días
	luz libre mas de 6m entre apoyos	21 días ++	14 días
Losas en una dirección			
	luz libre Menor a 3m entre apoyos	4 días ++	3 días
	luz libre de 3 a 6m entre apoyos	7 días++	4 días
	luz libre mas de 6m entre apoyos	10 días++	7 días
losas postensadas	inmediatamente después de que todo el preesfuerzo haya sido aplicado		

[£] No necesariamente consecutivas, durante las cuales la temperatura del aire que rodea el hormigón está arriba de los 10°C

* Si tales encofrados también soportan el encofrado de la base de losas o de vigas, se tomara el mayor tiempo de remoción

+ Del tipo que puede ser retirado si perturbar los puntales ni los encofrados

++ Si los encofrados pueden ser retirados sin perturbar los puntales, usar la mitad del tiempo pero no menos de 3 días

Fuente: Referencia 1

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI 347-01 Guide to Formwork for Concrete.
2. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) "Manual de la Construcción con Concreto". 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
3. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". 14ª ed., Gustavo Gili, SA, Barcelona.
4. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)
5. http://www.doka.com/doka/en_global/products/index.php

CAPITULO 14

FABRICACIÓN Y TRANSPORTE

FABRICACIÓN

14.1. FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Una vez determinada la dosificación más conveniente se procede a la fabricación del hormigón, para ello es necesario, en primer lugar, almacenar las materias primas y disponer de unas instalaciones de dosificación adecuadas, así como del correspondiente equipo de amasado.

14.1.1. DOSIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES (ver capítulo 11)

La correcta elaboración de un hormigón depende en gran medida del equipamiento del cual se dispone en la obra.

Los dispositivos de dosificación y pesaje deben garantizar la determinación exacta de las proporciones requeridas de los componentes: cemento, agregados, agua de amasado y aditivos.

14.1.2. MEZCLADO DE LOS COMPONENTES

El método y secuencia del mezclado con el cual los componentes son introducidos en la hormigonera, tiene gran importancia, por lo que debe ser objeto de exámenes preliminares.

Estos influyen sobre todo en:

- la buena dispersión de los componentes
- la eficacia del mezclado
- el efecto óptimo de los aditivos
- el rendimiento de la instalación

En nuestro medio se acostumbra introducir los materiales a la mezcladora en el siguiente orden: $\frac{1}{2}$ de agua, $\frac{1}{2}$ de agregados, todo el cemento, el resto de los agregados y el resto de agua; de las cantidades calculadas en la dosificación.

La efectividad de los aditivos variara dependiendo del momento en que son colocados durante la secuencia de mezclado. Y una vez que se ha determinado el momento apropiado para cargar los aditivos a la mezcladora, estos se deben cargar siempre en el mismo punto en cada mezclada. En cambio las fibras sintéticas para refuerzo pueden ser añadidas en cualquier momento del mezclado, en tanto 5min. de mezclado le continúe a su adición.

A cada tipo de mezcladora le corresponde un límite de carga mínimo por debajo del cual la homogeneidad no puede ser garantizada.

14.1.3. FORMAS DE PREPARAR

Actualmente se cuenta con dos formas de preparar el hormigón: Fabricado en planta o Industrial y No fabricado en planta que se subclasifica en Semindustrial y Rústico.

a) *Hormigón fabricado en Planta*

Es la forma más recomendable. Requiere disponer de una planta de hormigonado (figura 14.3) y de un servicio de control de calidad de producción (apartado 14.2). Así se consigue una gran homogeneidad y uniformidad de las masas de hormigón. Si no pertenece a las instalaciones propias de la obra (es decir, si su responsable es independiente del constructor) el hormigón se denomina *hormigón premezclado*.

b) *Hormigón no fabricado en Planta*

Es la fabricación en mezcladoras en obra. Su empleo no es aconsejable salvo en obras de poca importancia, por las grandes dispersiones que resultan de este tipo de preparación. Pero aun así es un sistema muy utilizado en la construcción común en nuestro medio. La diferencia entre el semindustrial (figura 14.1) y rústico (figura 14.2) es fundamentalmente el volumen de hormigón que se maneja.



FIGURA 14.1. Fabricación Semindustrial.
Canalización torrentera Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia.



FIGURA 14.2. Fabricación Rústica.
Construcción particular - Cochabamba
Fuente: Propia.

A veces las operaciones son efectuadas con sistemas poco adecuados como son los de dosificación por volumen. En este sistema la medición de los agregados se hace por volúmenes aparentes, con poca precisión, sin tener en cuenta su contenido de humedad, muy variable en el almacenamiento a cielo abierto; la cantidad de agua se estima según la apreciación visual de la consistencia y trabajabilidad. El cemento es fácilmente medible en peso, cuando se usa envasado en bolsas de 50 kg., por lo que es común referir los volúmenes de los agregados a la unidad de una bolsa.

14.1.4. MEDICIÓN DE LOS MATERIALES

La Norma Boliviana NB 604 “Hormigón – requisitos”, requiere que los materiales sólidos sean medidos por peso para su dosificación, sin embargo dictamina que cuando el hormigón a prepararse sea de un grado igual o inferior a H20 (20MPa) se pueden medir en volumen, siempre que:

1. Para el Cemento: se use el volumen equivalente a medio saco,
2. Para los Agregados:
 1. Se disponga de equipos regulables que midan con una tolerancia de $\pm 5\%$, el volumen equivalente a la masa especificada en la dosificación, (En tal caso, deben utilizarse recipientes de medida de poca sección y mucha altura, para minimizar los errores que se cometen en el enrase).
 2. Se haya determinado la equivalencia y se hagan las correcciones por humedad (en la forma indicada en el capítulo 11 de dosificación) y por esponjamiento.

TABLA 14.1 TOLERANCIAS EN LA MEDICIÓN DE LOS MATERIALES SEGÚN LA NB 604

Material	Tolerancia	Forma de medir	Observaciones
Cemento a granel	$\pm 1\%$	En peso	si es envasado deben usarse sacos completos
agregados	$\pm 3\%$	En peso	Debe corregirse además la humedad presente en el material
agua	$\pm 1\%$	En volumen	Debe tenerse muy en cuenta que el agua total de una masa de hormigón está constituida por el agua directamente añadida a la amasada, el agua que contienen los áridos (tanto de absorción como el agua superficial), el agua residual de lavado que pudiera quedar en la amasadora y, eventualmente, la que pudieran aportar los aditivos.
Aditivos	$\pm 3\%$	En peso	Uso de acuerdo a recomendaciones y tolerancias establecidas por el fabricante

Fuente Elaboración Propia

No deben mezclarse masas frescas que contengan distintos tipos de cementos no compatibles entre sí. Antes de comenzar la fabricación de una masa con un nuevo tipo de cemento, las hormigoneras deberán limpiarse perfectamente.

14.1.5. TIEMPO DE MEZCLADO

Las materias primas deben amasarse de forma que se consiga una mezcla íntima y homogénea, debiendo resultar el árido bien recubierto de pasta de cemento. El tiempo requerido para el mezclado se debe basar en la capacidad de la mezcladora para producir hormigón uniforme durante la mezcla y entre mezclas, y se debe determinar mediante pruebas a intervalos regulares durante el trabajo. El tiempo de mezclado se mide desde el momento en que todos los ingredientes han sido colocados a la

mezcladora. El período de batido, a la velocidad de régimen, no será inferior a 1 minuto, con la posible excepción del hormigón fabricado en planta.

14.2. HORMIGÓN FABRICADO EN PLANTA¹ (PREFABRICADO)

14.2.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Una planta de hormigonado consta de almacenamiento de materias primas, instalaciones de dosificación, equipos de amasado y equipos de transporte, y dispondrá de un laboratorio de control de calidad de producción. En cada planta debe haber un técnico de fabricación, que estará presente durante el proceso de producción, y otro técnico encargado del servicio de control de calidad.

Las instalaciones de dosificación disponen de silos con compartimentos adecuados y separados para cada una de las fracciones granulométricas necesarias de árido. Los equipos de amasado están constituidos por amasadoras fijas o móviles. Si el amasado se realiza parcial o totalmente en amasadora móvil, deberá efectuarse antes del transporte; luego, durante el transporte, sólo se permite girar la hormigonera a la velocidad de agitación (índice de rotación del tambor del camión mixer, cuando es usado para agitar el hormigón prefabricado) y no a la de régimen (índice de rotación del tambor del camión mixer o de las paletas en una mezcladora, al mezclar una carga; expresada en revoluciones por minuto (RPM)).



FIGURA 14.3. Fabricación en planta: a la izquierda balanza dosificadora de agregados, arriba der. Silos de alimentación de cemento, abajo der. camión mixer, al centro la caseta de control.

Planta COBOCE HORMIGÓN.

Fuente: Propia,

¹ JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". Capitulo 4, apartado 4.2..

14.2.2. HOMOGENEIDAD Y UNIFORMIDAD

Será necesario efectuar los ensayos pertinentes para comprobar la *homogeneidad* de un hormigón (mantenimiento de las características dentro de una misma amasada), así como la *uniformidad* del mismo (mantenimiento de características similares entre distintas amasadas).

a) La *homogeneidad* del hormigón se analiza determinando la dispersión que existe entre características de dos muestras tomadas de la misma amasada, para comprobar la idoneidad de los procesos de dosificación, amasado y transporte. En la tabla 14.2 se indican las tolerancias admitidas por la Instrucción Española en los ensayos efectuados para comprobar la homogeneidad del hormigón. Dichas tolerancias se refieren a la máxima diferencia entre los resultados de los ensayos de dos muestras tomadas de la descarga del hormigón (entre 1/4 y 3/4 de la descarga). Deberán obtenerse resultados satisfactorios en los dos ensayos del grupo A y, al menos, en dos de los cuatro del grupo B.

b) La *uniformidad* del hormigón se estudia evaluando, mediante el coeficiente de variación, la dispersión existente entre características análogas de distintas amasadas. Para ello, normalmente, se utilizan los valores de la resistencia a compresión a 28 días.

TABLA 14.2 COMPROBACIÓN DE LA HOMOGENEIDAD DEL HORMIGÓN.

Ensayos [†]	Tolerancia ^{**}	Observaciones
GRUPO A		
CONSISTENCIA		
Si el revenimiento medio es ≤ 9 cm.	3 cm.	-
Si el revenimiento medio es > 9 cm.	4 cm.	-
RESISTENCIA A COMPRESIÓN *	7,5%	respecto a la media
GRUPO B		
densidad del hormigón	16 kg/m ³	-
contenido de aire	1%	respecto al volumen del hormigón
contenido de árido grueso	6%	respecto al peso de la muestra
módulo granulométrico del árido	0,5	-
[†] Deberán obtenerse resultados satisfactorios en los dos ensayos del grupo A y en al menos dos de los cuatro del grupo B ^{**} Diferencia máxima tolerada entre los resultados de los ensayos de dos muestras tomadas de la descarga del hormigón (1/4 y 3/4 de la descarga) [*] Por cada muestra se romperán a compresión, a 7 días, dos probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Se determinará la medida de cada una de las dos muestras como porcentaje de la media total		

Fuente: Referencia 3

14.2.3. FORMAS DE ESPECIFICAR EL HORMIGÓN

Hay dos formas de especificar el hormigón:

Por resistencia: el suministrador establecerá la composición de la mezcla y garantizará la resistencia característica.

Por dosificación: recomendable sólo para casos de hormigones sin función resistente; o bien, para casos de hormigones especiales cuya composición se ha estudiado previamente en laboratorio por parte del solicitante.

En ambos casos el suministrador garantizará las características especificadas de tamaño máximo del árido, consistencia y contenido de cemento por metro cúbico de hormigón. Esta última limitación tiene por objeto evitar problemas indeseables de retracción y calor de fraguado excesivos.

Deberá tenerse en cuenta el tiempo que pueda transcurrir entre la fabricación y la puesta en obra del hormigón. A título orientativo se indica que, en condiciones medias, el tiempo transcurrido entre la adición del agua de amasado al cemento y a los áridos, y la colocación del hormigón, no debe ser mayor de hora y media. En tiempo caluroso, o en condiciones que contribuyan a un rápido fraguado del hormigón, el tiempo límite deberá ser inferior, a menos que se tomen medidas especiales.

14.2.4. TRANSPORTE A OBRA

El transporte del hormigón, desde la planta a la obra, puede efectuarse, bien en amasadoras móviles a velocidad de agitación, o en equipos adecuados que sean capaces de mantener la homogeneidad del hormigón. Para garantizar que el volumen contratado de hormigón es el que llega a obra las plantas de hormigón extienden un certificado de garantía por el volumen despachado y las bombas de los camiones mixer llevan un precinto de seguridad para garantizar que no existirán pérdidas en el trayecto.

El hormigón elaborado debe ser transportado lo más velozmente posible desde la planta a la obra. Obviamente debe ser usado rápidamente para poder conservar su calidad.

La calidad del camino influye fuertemente en la segregación de la mezcla, en relación a esto, sólo los camiones mixer están en condiciones de garantizar un transporte adecuado de un hormigón con consistencia plástica – blanda.

Descarga.- Las mezcladoras deben ser capaces de descargar el hormigón sin causar segregación.

Si el hormigón es transportado por camión mixer, es necesario que éste sea mezclado al momento del arribo por 1-2 minutos (30 revoluciones) antes de ser descargado, sobre todo cuando se trata de hormigones con aditivo incorporador de aire.

Si un vehículo no puede ser descargado en el momento de su arribo a la obra, debe esperar en un lugar protegido (a la sombra o bajo techo). Si la espera se prolonga, el hormigón sólo podrá ser utilizado para trabajos secundarios o provisionales (rellenados, caminos de obras, etc.).



FIGURA 14.4. Camión Mixer descargando por bombeo el hormigón para un pavimento en el distribuidor de la Recoleta

Fuente: Propia

Temperatura de la mezcla.- La uniformidad entre mezclas, particularmente con respecto al revenimiento, requerimientos de agua, y contenido de aire también depende de la temperatura del hormigón. Recomendaciones para el control de las temperaturas del hormigón se dan en el capítulo (hormigonado en tiempo frío y caliente)

Agua de mezclado.- Cuando sea posible, toda el agua de mezclado debe ser colocada en la planta de mezclado, aunque en clima calido es mejor dejar un poco de agua para cuando el camión llegue a la obra. Después de añadir el agua se deben dar 30 vueltas más a velocidad de régimen.

No se debe aumentar agua en un intento de recuperar el revenimiento, esto debe estar completamente prohibido, la máxima relación A/C nunca debe ser sobrepasada.

Luego del lavado de la mezcladora no debe quedar el agua en esta. Esta agua se puede quitar volcando la mezcladora, mientras da 5 a 10 vueltas a una velocidad media.

TRANSPORTE

14.3. TRANSPORTE DEL HORMIGÓN EN OBRA

14.3.1. EQUIPO PARA MOVER O MANEJAR EL HORMIGÓN

En este apartado se establecen algunas prescripciones para el transporte en obra, desde el camión o la mezcladora, en su caso, hasta el lugar de vaciado.

Gran parte del hormigón comercial se entrega desde una planta dosificadora o planta de mezclado fija por medio de camiones de mezclado en tránsito, que se usan como revolvedoras o batidoras. El hormigón se mueve desde el punto de entrega hasta la estructura o área de vaciado por distintos medios como ser canaletas, tuberías, cintas transportadoras, carretillas, etc., esto puede depender del método de fabricación del hormigón:

1. El Hormigón prefabricado es transportado por medio de bombas hasta su lugar de colocación.
2. El hormigón fabricado en mezcladoras in situ, es transportado por medio de carretillas y guinches, entre otros.

Las obras grandes situadas en donde no se dispone con facilidad de plantas comerciales de hormigón prefabricado, o por otras razones, pueden tener plantas dosificadoras y revolvedoras in situ (ej. Construcción de caminos).

Debe seleccionarse con cuidado el equipo para mover el hormigón desde su punto de entrega hasta su lugar en la obra terminada. Las características de la mezcla no deben ser regidas por el equipo, por el contrario, el equipo debe tener la capacidad de manejar, mover y descargar en forma libre el hormigón con el revenimiento, contenido de arena, tamaño máximo de agregado o proporciones de la mezcla que se consideren adecuados y el cual puede ser compactado por métodos apropiados para el efecto.

Cualquiera que sea la forma de transporte, deben cumplirse las siguientes condiciones:

- a) ***Durante el transporte no deben segregarse los áridos gruesos***, lo que provocaría en el hormigón pérdidas de homogeneidad y resistencia. Deben evitarse las vibraciones y choques, así como un exceso de agua, que favorecen la segregación. Los áridos rodados son más propicios a segregarse que los de machaqueo, dado el mayor rozamiento interno de estos últimos. La agitación del hormigón mientras se está moviendo reduce la segregación y permite que transcurra más tiempo entre el mezclado y el vaciado. La sacudida o vibración excesivas sin agitación tiende a segregar el hormigón.
- b) ***Debe evitarse, en lo posible, que el hormigón se seque durante el transporte***. La pérdida de revenimiento es causada por el aumento en la temperatura del hormigón y por el secado, así como por la pérdida de lechada. La mejor manera de evitar este secado es si se maneja el hormigón en forma inmediata, se protege contra el sol y el viento y si se pintan los recipientes expuestos al sol de blanco brillante, si el hormigón se ha de mantener en ellos por más de un corto tiempo
- c) Si al llegar al lugar de colocación el hormigón muestra un principio de fraguado, la masa debe desecharse y no ser puesta en obra.
- d) Cuando se emplean hormigones de diferentes tipos de cemento, se limpiará cuidadosamente el equipo de transporte antes de hacer el cambio.

14.3.2. EQUIPOS DE TRANSPORTE²

En seguida se da la descripción de parte del equipo básico que se usa para mover y manejar el hormigón después de que se recibe en el sitio de la obra.

Canaletas. (Fig. 15.9.) La segregación perjudicial se evita si se voltea, deja caer o deja deslizar el hormigón por un canaleta, y en tal caso, se hace de modo que los materiales se recombinen conforme se descargan. Esta constituye una manera fácil y rápida para transferir o mover el hormigón hacia una posición más baja. El ejemplo más común es la canaleta usada para descargar el hormigón de una mezcladora o mixer hacia cualquier otro equipo, o directamente hacia los encofrados (fig.15.7). Las canaletas deben tener una pendiente suficiente como para que el hormigón se mueva con un flujo continuo, y velocidad uniforme para que no se produzca segregación (tabla 14.3). No se deben usar canaletas planas (de poca profundidad) que requieren hormigón de baja calidad y alto revenimiento.

En los ductos abiertos inclinados (canaletas) se debe mantener un flujo continuo y una velocidad uniforme del hormigón. Para este efecto deben:

1. Tener una longitud no mayor que 7m
2. Terminar en un buzón que provoque una caída vertical del hormigón en su lugar de colocación (Fig. 15.9)
3. Respetar la pendientes máximas que se indican en la tabla 14.3

TABLA 14.3 PENDIENTES MÁXIMAS DE EQUIPOS INCLINADOS *

Asentamiento del cono (revenimiento) cm.	Pendiente vertical : horizontal
3 a 8	1 : 2
8 a 12	1 : 3

* Sin embargo se pueden tomar longitudes y pendientes mayores si se colocan accesorios (tolvas, compuertas), en la ubicación necesaria, que aseguren un flujo continuo y una velocidad uniforme. Figura 15.9.
Fuente: Referencia 1

² NB 604 Hormigones-Requisitos

**FIGURA 14.5.** CarretillaFuente: www.zaitegui.com

Guinche (figura 14.6). Es un medio de transportar hormigón a alturas elevadas, que consiste en un sistema de poleas, y que pueden ser a motor o manuales. En estos se pueden cargar carretones o baldes con hormigón.

Cucharones (figura 14.7). Los cucharones se transportan o manejan por grúa, grúa fija, monorriel, camión, vagón de ferrocarril, cable transportador, etc. Las compuertas para los cucharones deben ser herméticas a la lechada.

**FIGURA 14.7.** CucharónFuente: www.lemaco.cl**FIGURA 14.6.** Guinche elevando carretón con hormigónConstrucción particular- Cochabamba
Fuente: Propia

Transportadores. Los transportadores de banda (figura 15.9a) se usan para transferir el hormigón horizontalmente y a distancias moderadas en el sentido vertical. Los transportadores son relativamente baratos y pueden eliminar la necesidad de otro equipo auxiliar más caro, como lo son las grúas y las bombas. Los transportadores resultan útiles en particular en zonas de espacio limitado, como en los túneles. Se usan en zonas grandes como las losas de pisos y cubiertas de puentes. Se debe utilizar una canaleta para caída libre en el extremo de descarga de un transportador para ayudar a controlar la segregación. Los transportadores son particularmente útiles para hormigón de bajo revenimiento.

Bombas para hormigón. Las bombas (figura 14.4.) son de uso común para mover hormigón desde el camión de entrega hasta el lugar en donde se usa.

Canaletas cerradas para caída libre o tuberías. Estos dispositivos (figura 15.10c y 15.10d) están diseñados para entregar el hormigón hacia un lugar más bajo, con la finalidad de evitar la segregación que podría ocurrir debido al choque del hormigón contra el acero de refuerzo o cualquier otra obstrucción. Estos dispositivos se fabrican con tubería de caucho, tubería de plástico, lámina metálica o secciones cortas de tubería de acero sujetas entre sí, de modo que sean flexibles y puedan acortarse.

En los ductos cerrados (tuberías) que tengan un flujo continuo en sección llena, no se aplicaran las restricciones de pendiente, indicados en la tabla 14.3, ya que el hormigón que se baja verticalmente en tubos o “trompas de elefante” llenos se segrega muy poco.

BIBLIOGRAFIA

1. NB 604:1994 Hormigones – Requisitos.
2. ACI 304R-00 Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete.
3. EHE (Instrucción de Hormigón Estructural) Artículo 69, Fabricación y Transporte a obra del hormigón, http://www.mfom.es/cph/norma_ehe.html.
4. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) “Hormigón Armado”. 14ª ed., Gustavo Gili, SA, Barcelona.
5. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

CAPITULO 15

COLOCACIÓN

15.1. VACIADO

El hormigón tiene la capacidad de poder ser vaciado en una variedad sin fin de aspectos y formas, que no se pueden obtener con el uso de cualquier otro material común de construcción, y en particular el hormigón reforzado ofrece muchas ventajas en la creación de estructuras que son estética y económicamente superiores en comparación con otros materiales estructurales.

15.1.1. PREPARACIÓN DEL SITIO DE COLOCACIÓN¹

1. Limpiar y mojar cuidadosamente el sitio de colocación, eliminando los elementos sueltos, los restos de lechada de cemento, etc.
2. Si se vaciará sobre el terreno, ya sean losas o pavimentos, compactar y humedecer el mismo.
3. Verificar la impermeabilidad de dicho sitio, para evitar pérdidas de agua de amasado, inclusive las pérdidas por absorción del encofrado.
4. Aplicar desencofrantes, cuando sea necesario, que recubran uniformemente y sin exceso toda la superficie del encofrado, evitando contaminar las armaduras, los elementos embebidos y el hormigón ya colocado.
5. Preparar las juntas de acuerdo con lo indicado en el capítulo 17.

Otros cuidados

- No se debe comenzar el hormigonado si es que existe posibilidad de temperaturas de congelación, a menos que se disponga de protección adecuada, para esto referirse al capítulo 19.
- Las medidas de curado deben estar listas en el momento preciso, ver el capítulo 18 y a la ACI 308R.
- La velocidad de fabricación del hormigón debe ir en relación con la capacidad del equipo de trabajo y la mano de obra utilizada para la colocación y procesos de terminado.
- Se debe realizar una inspección final, antes del hormigonado: de las fundaciones, juntas de construcción, encofrados, refuerzo, etc.

15.1.2. SECUENCIA DE VACIADO EN LOSAS

En muchos casos, la manera más eficiente de vaciar el hormigón en áreas grandes, es en tiras largas, según lo ilustrado en la figura 15.1a

Las colocaciones en tiras, permite mayor acceso a las secciones que son vaciadas. Las juntas de contracción intermedias, se ponen a intervalos especificados transversales a la longitud de las tiras.

Tiras anchas pueden requerir la instalación de juntas de contracción longitudinales.

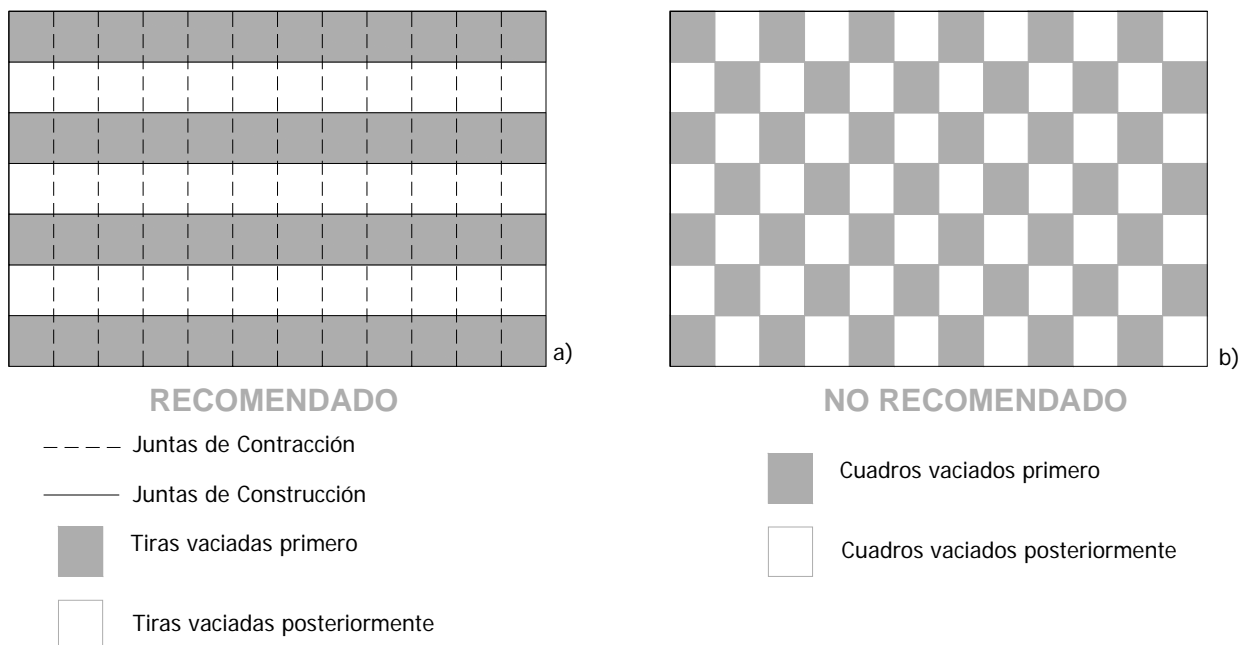


FIGURA 15.1. Secuencia de Vaciado a) Tiras largas, recomendadas b) Tablero de ajedrez, no recomendado

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 6

Una secuencia de vaciado de tablero de ajedrez, con dimensiones laterales de 15,2m o menos, según lo mostrado en figura 15.1b, se han utilizado para permitir a los primeros vaciados contraerse y conseguir un espesor de junta mínimo. La experiencia ha demostrado que la contracción de los primeros vaciados, ocurre muy lentamente como para que este método sea eficaz. El acceso es más difícil y costoso, y las juntas pueden no quedar tan bien. El comité de la ACI no recomienda que se vacíe en la secuencia de tablero de ajedrez, debido a que requiere más tiempo y material de encofrado y usualmente resulta en superficie menos regulares y mala transferencia de carga en las juntas.

15.1.3. ELEMENTOS EMBEBIDOS

Al momento del vaciado el acero de refuerzo y otros elementos embebidos deben estar limpios, sin barro, aceite u otros materiales que puedan afectar de forma adversa su capacidad de adherencia.

La mayor parte del acero de refuerzo se encuentra cubierto con óxido, esto se considera aceptable siempre que el óxido suelto sea removido y que las dimensiones mínimas del acero no sean menores a las recomendadas en el capítulo de aceros apartado 5.3.

¹ NB 604 pag. 12 apartado 5.5.1

Se debe tener cuidado para asegurarse que:

- Todo el refuerzo este colocado en la posición de acuerdo a los planos,
- Sean del diámetro y longitud especificados
- Se mantenga el recubrimiento requerido al acero de refuerzo.

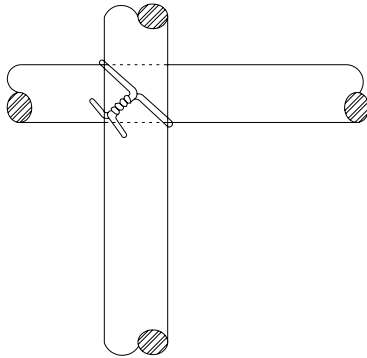


FIGURA 15.2. Atadura típica

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 7

La colocación exacta del acero de refuerzo y elementos embebidos es de suma importancia. El acero de refuerzo debe sostenerse con firmeza en su posición adecuada (atándose, figura 15.2, y apoyándose correctamente, para este fin se suelen utilizar caballetes de metal, figura 15.3c), como se indique en los planos constructivos, antes de vaciar el hormigón.

La manera más común para mantener unidas las barras es con alambre de amarre. Se atan un número suficiente de intersecciones del refuerzo, para evitar que éste se desplace. No es necesario atar todas las intersecciones. Las ataduras no agregan resistencia a la estructura acabada, su única función es mantener las barras en su posición adecuada hasta que se haya vaciado el hormigón. Aun cuando se atan los empalmes montados, el hormigón que los rodea forma el empalme real.

15.1.3.1. EMPALMES Y CONEXIONES MECÁNICAS

En elementos donde se necesitan barras de mayor longitud de las con que se cuenta, las uniones deben ser especificadas, mediante notas, por el diseñador. Se debe especificar como serán realizadas las conexiones, ya sean por sobreposición, mediante conectores mecánicos, o por soldadura, y además la posición donde se realizara la unión.

Los requisitos para la aplicación de estos métodos se dan en la ACI 315 artículo 2.7, y en el EHE artículo 66.6.

La determinación de la longitud de desarrollo se puede realizar mediante lo expresado en la ACI 318M cap12 o en el EHE artículo 66

A continuación se describe brevemente cada uno de estos. Para mayores detalles, referirse a textos especializados.



FIGURA 15.3. **a)** galletas para mantener el encofrado a la distancia especificada de recubrimiento, **b)** galletas para mantener la armadura en su posición en una viga cajón, **c)** caballetes para mantener la armadura en su posición, en una losa, durante la puesta en obra, y **d)** caballetes utilizados par mantener las guías de la regla vibratoria durante el vaciado, y acabado.

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia

15.1.3.1.1. EMPALMES POR TRASLAPE.

Este es el método más común para empalmar barras de refuerzo. Las barras pueden quedar con un espacio ente ellas o estar en contacto. Se prefiere que los empalmes entre barras, sean de contacto, ya que atadas juntas con alambre, se aseguran con más facilidad contra el desplazamiento durante el vaciado del hormigón.

En los empalmes por traslape sin contacto, el espaciamiento entre barras no debe ser mayor que $\frac{1}{5}$ de la longitud de traslape ni más de 15 cm, ya que si no, se formaría una grieta en zigzag entre ellas.

Es necesario mostrar donde será realizado el empalme y la longitud de traslape (longitud de desarrollo) entre barras, ya que la resistencia del empalme montado varia según el diámetro de la barra, la resistencia del hormigón , el espaciamiento entre barras, recubrimiento, posición de la barra, distancia hacia otras barras y el tipo de esfuerzo (tracción o compresión).

La ACI 318 no permite empalmes por traslape para barras mayores de $\varnothing 36\text{mm}$, excepto en el caso de elementos a compresión donde se permite que barras $\varnothing 45\text{mm}$ y $\varnothing 57\text{mm}$ se empalmen con barras de menor diámetro, así como en fundaciones de edificios, para transferir compresión hacia barras de transferencia ($\varnothing \leq 36\text{mm}$) embebidas en estas fundaciones.

En los empalmes entre columnas se deben extender la suficiente cantidad de barras, de la columna inferior, para proveer la cantidad de acero requerida en la columna superior. Estas barras se deben extender la distancia mínima requerida para el empalme montado. Se debe tomar en cuenta que a menos que se especifique o dibuje en los planos, se deben extender las barras restantes, de la columna inferior, 75 mm desde la parte superior del elemento que transmita la carga hacia la columna (losa o viga).

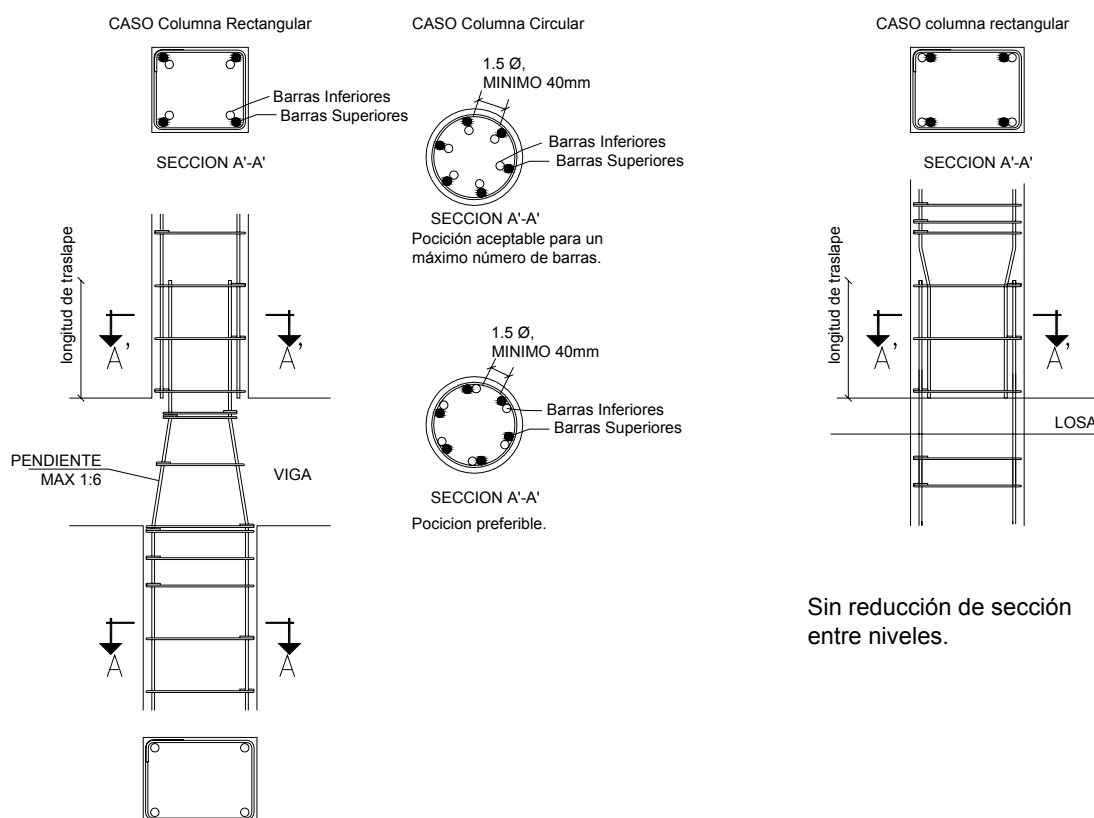


FIGURA 15.4. Detalle de empalmes por traslape en columnas

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 2

15.1.3.1.2. EMPALMES SOLDADOS.

Un empalme totalmente soldado deberá desarrollar por lo menos un 125% del límite de fluencia de la barra, según el ACI y según el EHE deberá tener por lo menos la misma resistencia a la rotura que la menor de las dos barras empalmadas.

Los aceros soldables se designan con una letra "S" (ej. Belgo CA50 S).

Existen muchos métodos y procedimientos diferentes para soldar, dado que los aceros con diferente composición química son alterados de distinta manera por el calor de la soldadura.

El procedimiento para soldar que produzca soldaduras resistentes sin grietas depende de la composición química de las barras de refuerzo. Un procedimiento que sea adecuado para una composición química puede ser por completo inapropiado para otra composición con el mismo grado de resistencia. Es esencial la determinación de la composición del acero que va a soldarse, antes de establecer un procedimiento para soldar.

Métodos de soldadura

El proceso manual de soldadura de uso más común es la soldadura de *arco eléctrico*. En este método se usa un electrodo de barra metálica consumible. Es de vital importancia seguir al pie de la letra las recomendaciones del fabricante y que en ninguna condición se use un electrodo revestido que se haya humedecido.

La *soldadura por resistencia* sólo se utiliza en la fabricación en taller del acero de refuerzo, en particular para las mallas de alambre soldado y las parrillas de barras de refuerzo. La soldadura se lleva a cabo por una combinación de calor y presión. Debido al equipo necesario, este método nunca se utiliza en campo en la soldadura del acero de refuerzo.

Tipos de empalmes soldados. Probablemente el empalme soldado menos deseable es el *Empalme Soldado Traslapado* que se muestra en la figura 15.5a. Cuando se carga un empalme soldado traslapado, la excentricidad de las barras causan una distorsión por flexión, como se muestra en la figura 15.5b. Esta distorsión tiende a cuartear la cubierta de hormigón, lo que produce un empalme bastante insatisfactorio. En particular, los empalmes soldados traslapados no son satisfactorios para empalmar los tamaños más grandes de las barras de refuerzo. En los casos en los que se van a empalmar barras más pequeñas y se suministran ataduras y estribos para evitar las cuarteaduras, se pueden producir empalmes satisfactorios. Los *Empalmes Soldados a Tope* que se muestran en las figuras 15.5c a 15.5f son las soldaduras preferidas para los empalmes de barras de refuerzo, ya que el esfuerzo se transfiere directa y concéntricamente a través de la unión, con lo que se produce un empalme compacto y eficiente.

No se recomienda la conexión de barras cruzadas por medio de soldaduras pequeñas de arco, conocidas como "soldaduras por puntos". En los códigos de construcción y el ANSI/ AWS D1.4 se prohíbe la soldadura por puntos para armar el refuerzo, a menos que sea autorizado por el ingeniero.

TABLA 15.1 SOLDADURAS RECOMENDADAS, SEGÚN EL DIÁMETRO, POR LA ANSÍ/AWS D1.4
(código para la soldadura estructural: acero de refuerzo de la American Welding Society-
Sociedad Americana de la Soldadura)

Tipo de Soldadura	Recomendación	Figura
• <i>Empalme soldado traslapado</i>	$\leq \varnothing 20\text{mm}$	15.5a y 15.5b
• <i>Empalmes soldados a tope:</i>		
Soldadura con ranura en V sencilla de 60°	$\leq \varnothing 28\text{mm}$	15.5e
Soldadura de ranura en V sencilla	$\geq \varnothing 28\text{mm}$	15.5e
Soldadura con doble ranura en V	Barras colocadas en posición horizontal	15.5c
Empalmes directos soldados a tope	Barras colocadas en posición vertical	15.5d

Fuente: Elaboración Propia

Puede presentarse una situación peligrosa en donde se esta soldando en la vecindad de tendones de alta resistencia para preesforzar el hormigón. No debe permitirse que se realicen soldaduras cerca de estos tendones, ya que incluso la más pequeña salpicadura de metal de aporte puede provocar la falla de un tendón durante la operación de aplicación del esfuerzo. El tendón para preesforzar nunca se debe usar como descarga a tierra al momento de soldar. En la práctica no se debe permitir que se realice corte o soldadura alguna en torno a los tendones para preesforzar, una vez que estos tendones se encuentran en su lugar.

Cuando el uso de empalmes por traslape o soldados deja de ser económico o práctico, por ejemplo en tramos de traslape muy largos, ubicación de las juntas de construcción, disposiciones para construcción futura, etc, cuando causa congestión o problemas de colocación en el campo, o cuando su uso no lo permiten los códigos o especificaciones de diseño, entonces pueden resultar adecuados las conexiones mecánicas o los empalmes soldados.

Recomendaciones²

De la experiencia y de la literatura especializada se entresacan las siguientes:

- El número y posición de las uniones soldadas deben figurar en los planos. Conviene reseñar también el método de soldeo.
- Las uniones soldadas deben proyectarse en zonas alejadas de fuertes tensiones, siempre que sea posible y preferiblemente, próximas a las zonas de momento nulo.
- No es conveniente concentrar en una misma sección más del 20 % de empalmes soldados respecto al total de barras.
- Las dos recomendaciones anteriores no son necesarias para barras que trabajen a compresión.
- No deben disponerse soldaduras en los codos, ángulos o zonas de trazado curvo de las armaduras.

² JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". Artículo 8.3.6°.

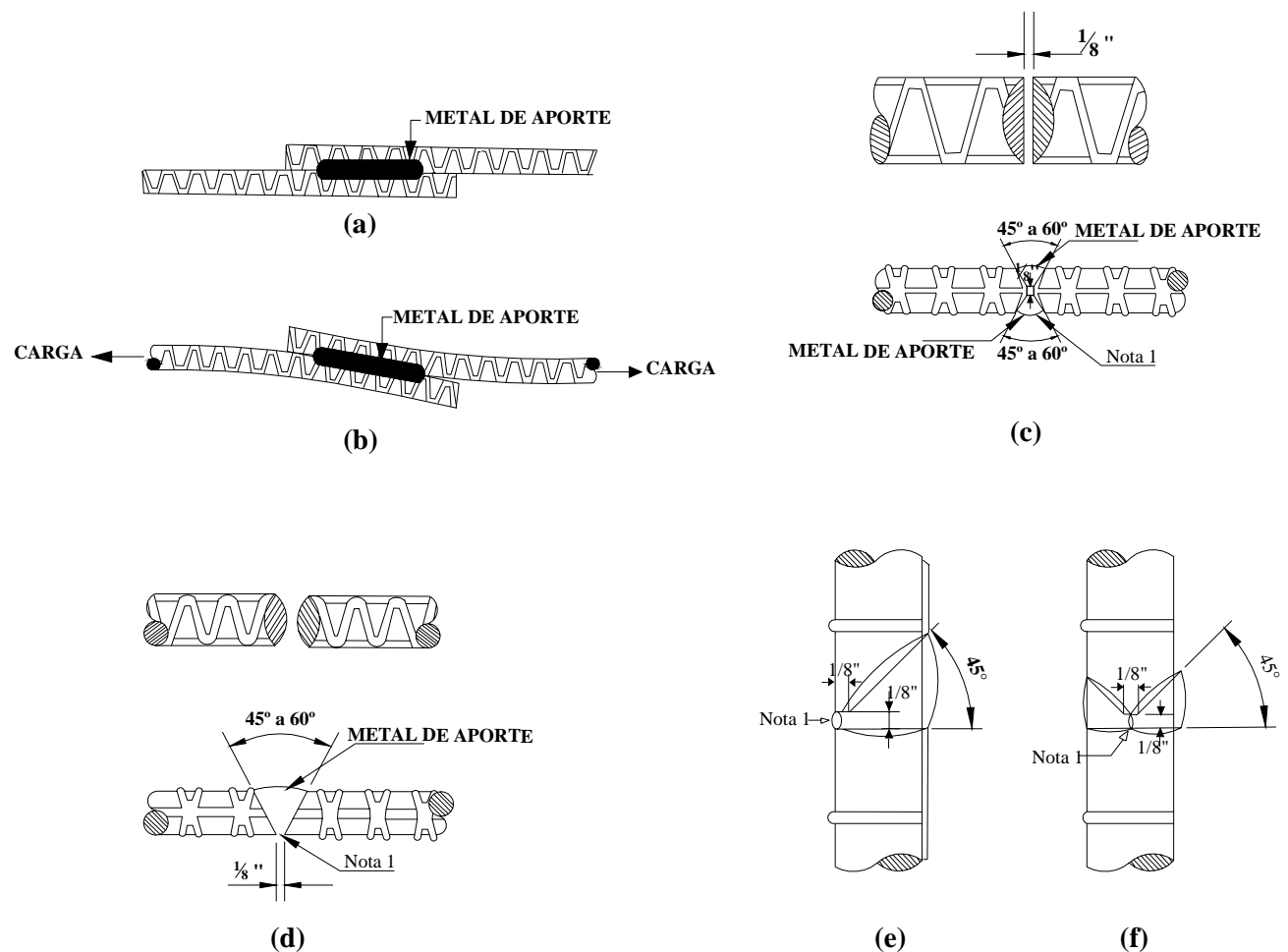


FIGURA 15.5. **a) y b)** Empalme soldado de traslape sencillo **c)** Empalme soldado con doble ranura en V sencilla (para varillas colocadas en posición horizontal) **d)** Empalmes directos a tope para varillas colocadas en posición vertical. **e)** Soldadura con ranura en bisel sencillo. **f)** Soldadura con ranura en doble bisel.

* Nota 1 desbárbese, esmerílese o escopléese con la gubia hasta el metal sólido antes de soldar el otro lado.

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 7

- Conviene distanciar las soldaduras correspondientes a barras contiguas en 10 diámetros
- Cuando no actúen esfuerzos dinámicos, puede contarse con una capacidad resistente de la unión soldada igual al de las barras, siempre que la ejecución este sometida a control.
- Cuando puedan actuar esfuerzos dinámicos es prudente contar tan solo con el 80% de la capacidad mecánica de las barras y extremar el control en la ejecución.
- Las soldaduras por traslape deben rodearse de estribos adicionales para absorber las tensiones tangentes que aparecen en su entorno.

15.1.3.1.3. CONEXIONES MECÁNICAS.

Los códigos y especificaciones de diseño determinan una resistencia mínima de la conexión, que según el ACI debe ser de 125% del límite de fluencia de la barra, cuando esta este sometida a tensión o compresión, y según el EHE deberá tener por lo menos la misma resistencia a la rotura

que la menor de las dos barras empalmadas.

En esencia, existen tres tipos básicos de conexiones mecánicas:

- De tensión-compresión (que pueden resistir tanto fuerzas de tensión como de compresión)
- Sólo de compresión (también conocida como conexión mecánica de *apoyo en el extremo*)
- Sólo de tensión

En la actualidad existen diversos dispositivos para conexión mecánica. Los métodos que se aplican para conectar barras son los siguientes:

Roscado (figura 15.6c), Estampado en frío (fig 15.6a), extrusión en frío o forjado en caliente, Manguitos de acoplamiento rellenos con acero (fig 15.6d), Manguitos de acoplamiento rellenos con *lechada de cemento*, Sujeción o fricción.

Un amplio desarrollo de los dispositivos patentados para conexiones mecánicas se encuentran en el ACI 439.3R, en el que se presentan amplias descripciones de las características físicas, características mecánicas y procedimientos de instalación de los diversos dispositivos existentes para conexión mecánica.

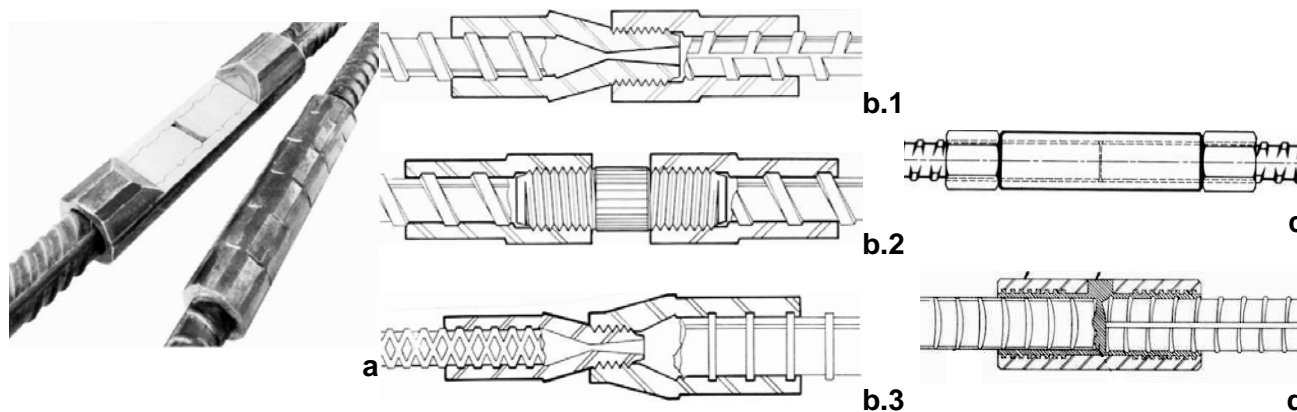


FIGURA 15.6. Distintos tipos de conexiones mecánicas: a) estampado en frío, b.) acoples estampados en frío con rosca, b.1) de 2 piezas b.2) de 3 piezas, b.3) de transición; c) acople para barras corrugadas en forma de rosca; d) acoples rellenos con acero, para tracción-compresión.

Fuente: Referencia 4

15.1.4. HORMIGONADO EN CASOS CORRIENTES

La altura hasta la que debe llegar el hormigón una vez vaciado, debe estar limitada por la resistencia del encofrado a la presión que sobre el se ejerce.

Se debe vaciar el hormigón en capas horizontales de un espesor no mayor que 50cm, cuidando que:

- a) Para una estructura monolítica se debe colocar la siguiente capa mientras la inferior todavía puede ser vibrada.

- b) Durante el vaciado se eviten segregaciones por escurrimiento.
- c) Cada capa pueda ser compactada en toda su altura con el equipo en uso. Cuando se use un vibrador de inmersión, la capa debe tener una altura inferior a la longitud de la cabeza del vibrador.

La altura de caída del hormigón medido desde el punto de vaciado hasta el lugar de depósito definitivo, debe ser la menor posible. En el caso de estructuras verticales (muros, columnas, etc.), esta altura no debe sobrepasar los valores indicados en la tabla 15.2, según el asentamiento del cono:

TABLA 15.2 ALTURA MÁXIMA DE CAÍDA DEL HORMIGÓN SEGÚN LA NORMA BOLIVIANA

Asentamiento [cm]	Altura máxima [m]
< 4	2
4 a 10	2.5
>10	2

Cuando se utilizan tuberías se puede dejar caer el hormigón por varios metros sin segregación (figura 15.10)

Fuente: Referencia 1

No obstante, se puede usar una mayor altura de caída en los siguientes casos:

- a) Que se remezcle manualmente, si se trata de estructuras abiertas.
- b) Que se emplee tuberías introducidas hasta el fondo de la estructura a hormigonar, las que deben tener un diámetro mayor que 4 veces el tamaño máximo nominal del árido y no menor que 15cm. (Figura. 15.10)

En el caso de elementos estructurales con fondos inclinados, el llenado se debe iniciar desde el punto mas bajo, formando capas horizontales.

El vaciado de Carretillas, volquetas u otros equipos similares de transporte, se debe efectuar en el sentido contrario al avance del hormigonado (Figura 15.10b).

Si fuera necesario ayudar al paso del hormigón a través de las armaduras, se debe usar solamente una barra de acero terminada en arco o una espátula, evitando golpear los Áridos gruesos o desplazar las armaduras.

En el momento de la colocación, deben cumplirse las siguientes condiciones de temperatura:

- La temperatura del hormigón, debe ser menor que 35°C, en elementos corrientes y menor que 16°C, en elementos cuya menor dimensión exceda de 0,80 m.
- La temperatura ambiente debe ser mayor que 5°C.

15.1.4.1. MÉTODOS CORRECTOS E INCORRECTOS DE MANEJO Y VACIADO DEL HORMIGÓN.

En las figuras 15.7 a 15.11 se muestran algunas de las maneras correctas e incorrectas de manejar y vaciar el hormigón. Un estudio de estos valores y sus títulos darán una mejor comprensión de los principios que intervienen, y ayudará en gran parte al hacer la selección del equipo adecuado para vaciar el hormigón, a utilizar apropiadamente el equipo y a analizar y corregir las dificultades que se presenten en el vaciado.

Las precauciones:

- Una regla básica es que el hormigón debe depositarse tan cerca como se pueda de su colocación final ya que este tiende a segregarse cuando tiene que ser movido lateralmente. El hormigón consiste en agregado grueso y mortero y éstos se separarán si existen las condiciones y si se presenta la oportunidad.
- Para minimizar la segregación o separación, siempre que sea posible, resulta conveniente dejar caer el hormigón en forma vertical, en lugar de que se haga formando un ángulo (figuras. 15.7 a 15.11). Debe haber un corto canalón vertical de caída libre en el extremo de los canalones inclinados o en el extremo de los transportadores de banda.
- Acomodar el equipo de modo que el hormigón tenga una caída vertical sin restricción hasta su posición final. La corriente del hormigón no debe ser separada, al dejarla caer libremente sobre las barras de refuerzo u otros materiales encajados en el encofrado (figura 15.10a). Si el encofrado es lo suficientemente amplio y sin obstrucciones para dejar que el hormigón caiga verticalmente, se puede realizar una descarga directa sin el uso de las tolvas, tubos o canaletas.
- Si un proyecto implica la colocación monolítica de una viga de gran canto, un muro, o una columna, con una losa u otro elemento por encima, se debe esperar a que el hormigón del elemento que se encuentra abajo se asiente, antes de colocar el del elemento que ira encima. El tiempo para que esto suceda depende de la temperatura y las características de colocado del hormigón vaciado, pero usualmente es de 1hr. Pasado este lapso el hormigonado debe reanudarse para integrar la nueva capa con la antigua por medio de una vibración enérgica.
- Debido a que el hormigón suele exudar, es decir, los sólidos se asientan y el agua se mueve hacia la parte superior, el hormigón que se vacíe se debe hacerlo con un revenimiento más bajo (relación A/C más baja) en la capa de más arriba, compensando de esta manera la ganancia de agua, con lo que se obtiene un hormigón de aspecto uniforme y se asegura que sea más durable

en la parte superior, en donde las condiciones de congelación y deshielo suelen ser más severas (figura. 15.11c).

15.1.5. OTROS MÉTODOS DE VACIADO DEL HORMIGÓN

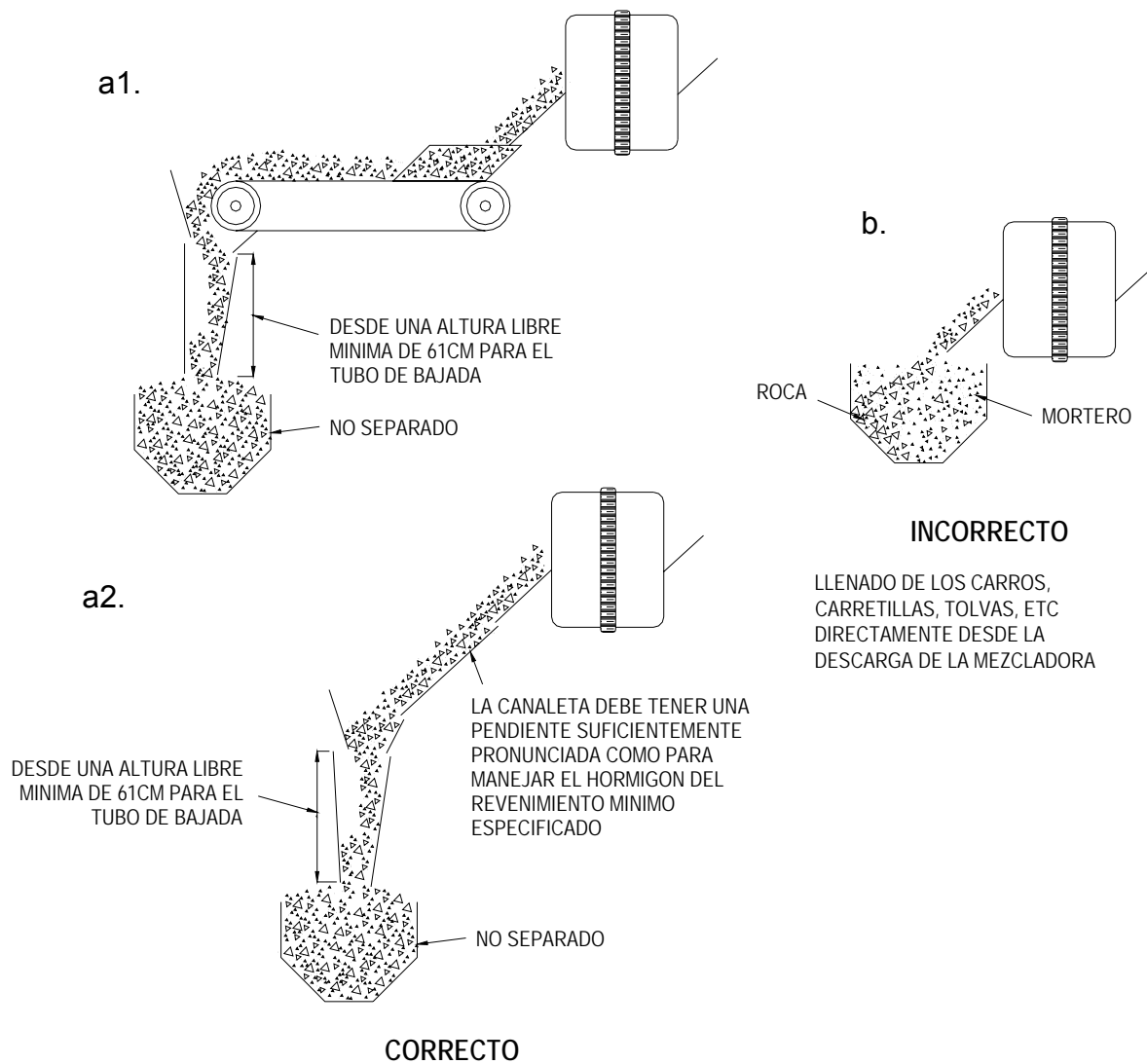
Además existen métodos especiales como:

- Hormigón con Agregado Precolocado, también llamado Hormigón Inyectado (ver apartado 20.10), por Bombeo, métodos específicos para vaciado bajo agua, hormigón Pesado y Liviano (ver apartados 20.4 y 20.12 respectivamente); todos estos se pueden encontrar mas desarrollados en la ACI 304R.
- Hormigón Lanzado (ver apartado 20.11)
- Hormigón Compactado con Rodillo (ver apartado 20.3)
- Colocación del Hormigón con equipo de pavimentación (ver ACI 325.9R).
- Hormigón masivo (ver apartado 20.2) y consideraciones sobre la temperatura se dan en la ACI 207.1R.

TABLA 15.3 SISTEMAS DE TRANSPORTE DEL HORMIGÓN EN FUNCIÓN A SU CONSISTENCIA

Colocación mediante	Consistencia del hormigón			
	Rígida	Plástica	Blanda	Flúida
Cinta transportadora	■	■		
Grúa		■	■	
Tubo Vertical			■	
Bomba			■	■
Plano inclinado (largo máx. 3 m)			■	■
Canal inclinado				■

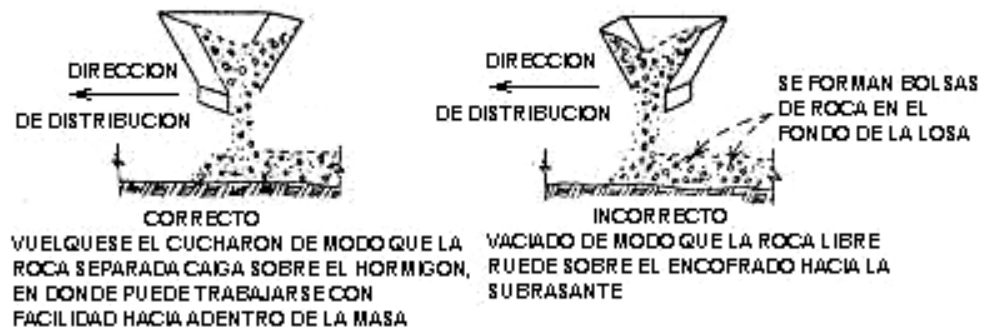
Fuente: Referencia 9



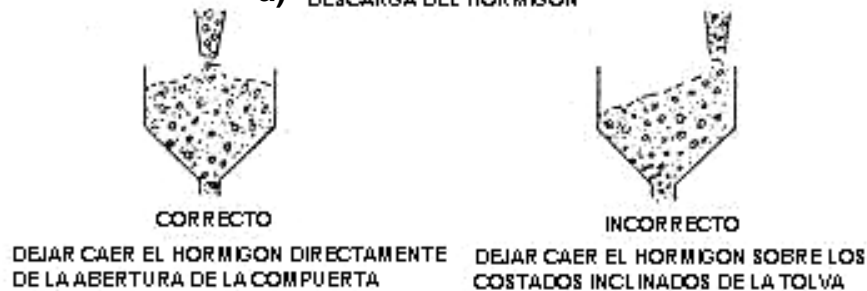
CUALQUIERA DE LAS DOS POSICIONES ILUSTRADAS A LA IZQUIERDA EVITA LA SEPARACION, SIN IMPORTAR LA LONGITUD DE LA CANALETA O TRANSPORTADOR, YA SEA QUE EL HORMIGON SE DESCARGUE A CARROS, CARRETILLAS, TOLVAS, ETC.

FIGURA 15.7. A menos que la descarga de la mezcladora se controle correctamente, se destruye la uniformidad resultante de un mezclado eficaz, por la segregación.

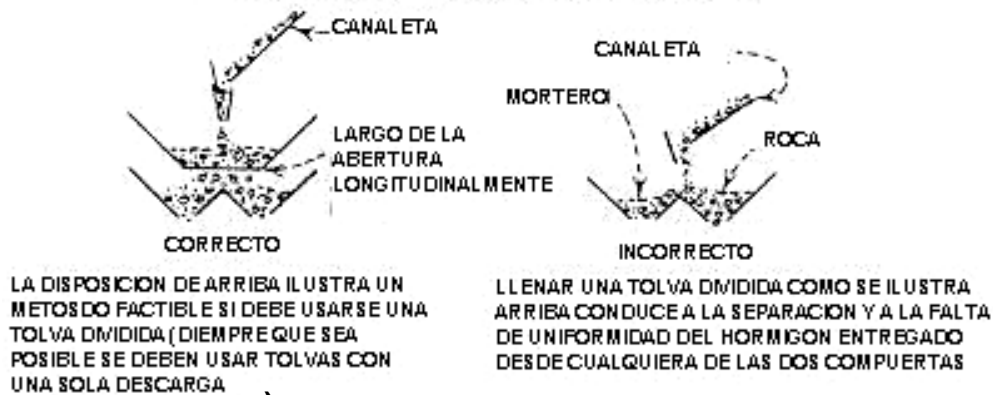
Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 7



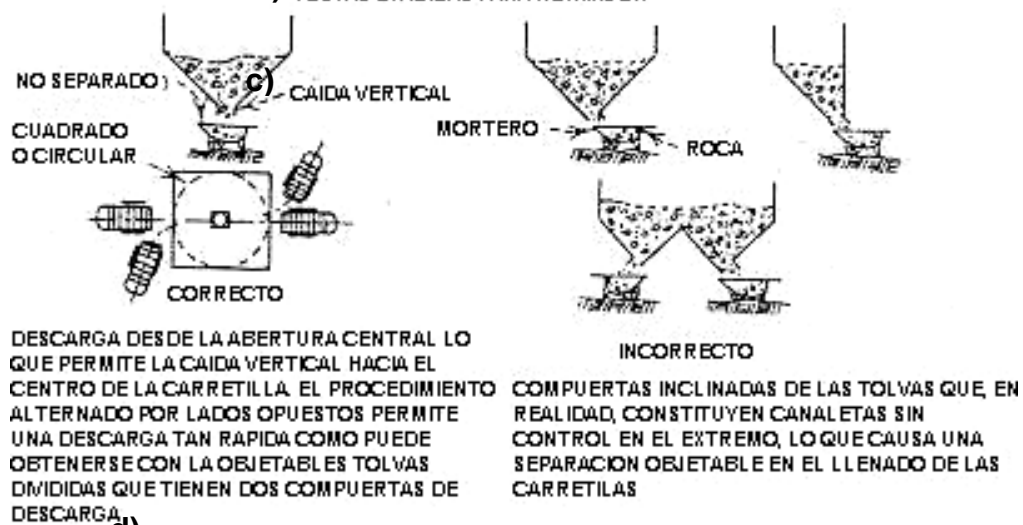
a) DESCARGA DEL HORMIGON



b) LLENADO DE TOLVAS O CUCHARONES PARA HORMIGON



c) TOLVAS DIVIDIDAS PARA HORMIGON



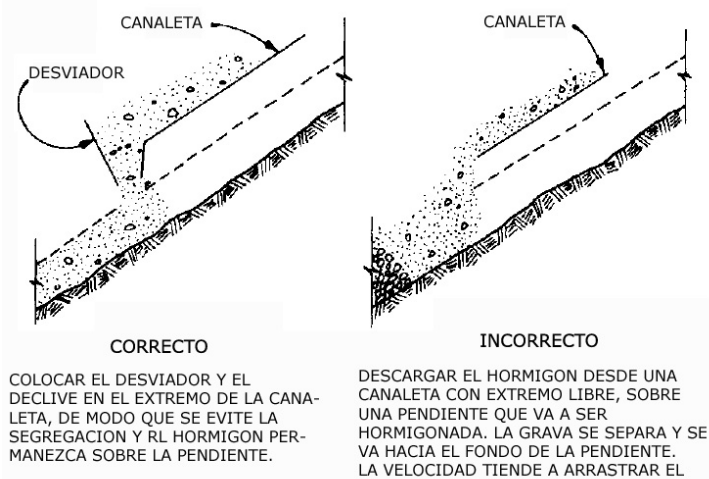
d) DESCARGA DE TOLVAS PARA CARGAR CARRETILLAS PARA HORMIGON

FIGURA 15.8. Métodos correctos e incorrectos para cargar y descargar cucharones y carretones para el hormigón. El procedimiento correcto minimiza la separación del agregado grueso del mortero.

Fuente: Referencia 6



a) CONTROL DE LA SEGREGACION DEL HORMIGON EN EL EXTREMO DE UNA BANDA TRANSPORTADORA



b) VACIADO DEL HORMIGON SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA



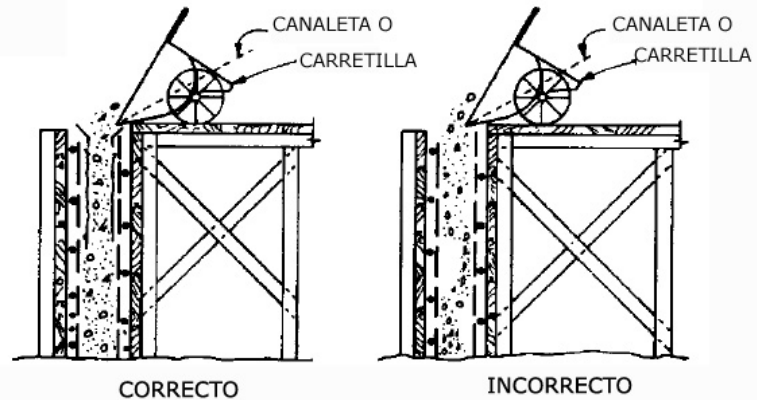
c) CONTROL DE LA SEGREGACION EN EL EXTREMO DE LAS CANALETAS PARA HORMIGON

ESTO SE APLICA A DESCARGAS INCLINADAS DESDE MEZCLADORAS, CAMIONES MIXER, ETC, ASI COMO A CANALETAS MAS LARGAS, PERO NO CUANDO EL HORMIGON SE DECARGA HACIA OTRA CANALETA O SOBRE UNA BANDA TRANSPORTADORA

FIGURA 15.9. Control de la segregación del hormigón

Fuente: Referencia 7

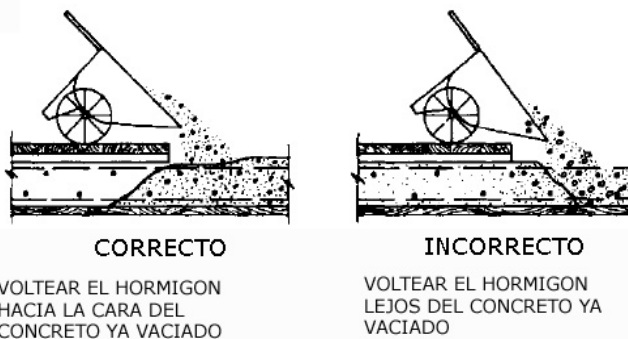
EL HORMIGÓN SE SEGREGARÁ SERIAMENTE SI NO ES VACIADO DENTRO DE LOS ENCOFRADOS APROPIADAMENTE



CORRECTO
DESCARGAR EL HORMIGÓN HACIA UNA PEQUEÑA TOLVA, PARA ALIMENTAR LA CANALETA, LIGERA Y FLEXIBLE, DE CAÍDA LIBRE. SE EVITA LA SEGREGACIÓN. EL ENCOFRADO Y EL ACERO ESTÁN LIMPIOS HASTA QUE LOS CUBRE EL HORMIGÓN

INCORRECTO
PERMITIR QUE EL HORMIGÓN DE LA CANALETA O CARRETILLA CHOQUE CONTRA EL ENCOFRADO Y REBOTE SOBRE LAS BARRAS Y CARAS DEL ENCOFRADO, LO QUE CAUSA SEGREGACIÓN Y FORMACIÓN DE CANGREJERAS EN EL FONDO

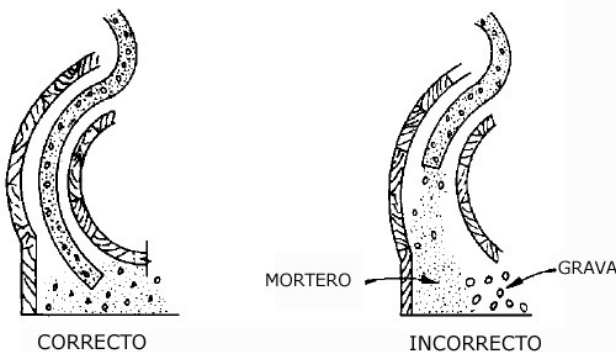
a) VACIADO DE HORMIGÓN EN LA PARTE SUPERIOR DE UN ENCOFRADO ANGOSTO



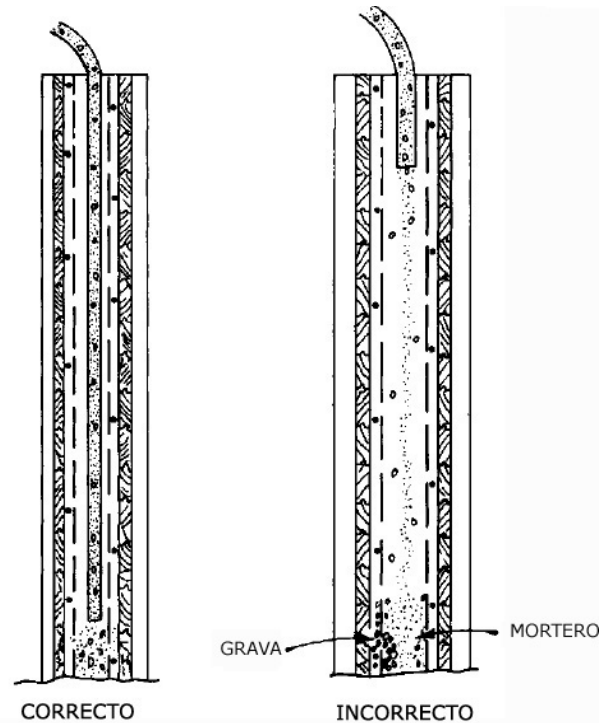
CORRECTO
VOLTEAR EL HORMIGÓN HACIA LA CARA DEL CONCRETO YA VACIADO

INCORRECTO
VOLTEAR EL HORMIGÓN LEJOS DEL CONCRETO YA VACIADO

b) VACIADO DE HORMIGÓN PARA LOSAS, DESDE CARRETILLAS



c) VACIADO DE HORMIGÓN EN LA PARTE SUPERIOR DE UN ENCOFRADO ESTRECHO, POR MEDIO DE BOMBA Y MANGUERA



d) VACIADO EN MUROS PROFUNDOS O CURVOS, POR MEDIO DE BOMBAS Y MANGUERAS

FIGURA 15.10. Métodos correctos e incorrectos de vaciar el Hormigón

Fuente: Referencia 5

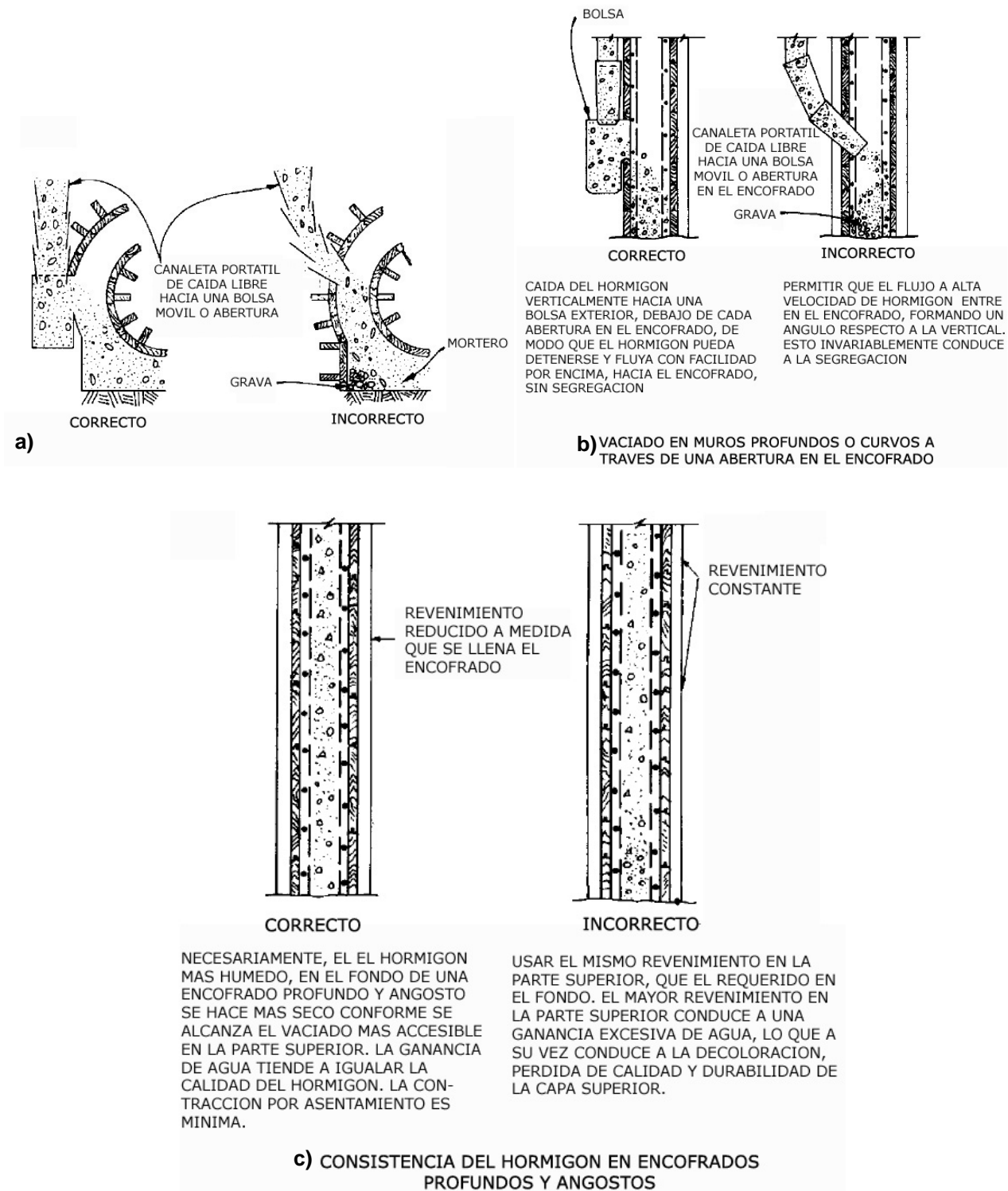


FIGURA 15.11. Vaciado del hormigón en encofrados angostos y curvos.

Fuente: Referencia 7

BIBLIOGRAFIA

1. NB 604:1994 Hormigones – Requisitos.
2. ACI 315-99 Details and Detailing of Concrete Reinforcement.
3. ACI 318M-02/318RM-02(metric) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
4. ACI 439.3R-91 Mechanical Connections of Reinforcing Bars.
5. ACI 304R-00 Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete.
6. ACI 302.1R-96 Guide for Concrete Floor and Slab Construction
7. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) “Manual de la Construcción con Concreto”. 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
8. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) “Hormigón Armado”. 14ª ed., Gustavo Gili, SA, Barcelona.
9. <http://www.construaprende.com>.
10. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)
11. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association “Design and Control of Concrete Mixtures”. 14ª ed., www.portcement.org

CAPITULO 16

CONSOLIDACIÓN (COMPACTACIÓN)

16.1. COMPACTACIÓN

Una vez que el hormigón se ha depositado en los encofrados debe compactarse para dar lugar a una masa sólida, homogénea, sin defectos como bolsas de rocas, vacíos o vetas de arena.

Si se permitiese al hormigón endurecer sin haber aplicado ningún tipo de compactación, este sería débil, poroso, tendría mala adherencia con el refuerzo, no sería uniforme y tendría un mal aspecto. El objetivo de la compactación es de remover todo ese aire ocluido en la mezcla, induciendo a las partículas sólidas, del hormigón o mortero recién mezclado, a reacomodarse de manera que se alcance su posición de máxima densidad.

Las ventajas de un hormigón compacto son las siguientes:

- Elevada impermeabilidad
- Mejor durabilidad
- Elevada resistencia a la compresión
- Mejor adherencia del hormigón a la armadura.

Recomendaciones detalladas para el equipo y los procedimientos para la compactación se dan en la ACI 309R.

16.2. MÉTODOS DE CONSOLIDACIÓN

Se debe escoger el método de compactación según la consistencia de la mezcla, las condiciones de colocación, la forma del encofrado, la cantidad de refuerzo, etc., de manera que se eliminen los huecos y se obtenga un completo sellado de la masa, sin que llegue a producirse segregación. Para esto muchos métodos manuales y mecánicos están disponibles.

Mientras mas seca sea la mezcla, mayor esfuerzo se requerirá para alcanzar la consolidación apropiada, y si esta no se proporciona, la calidad del hormigón caerá rápidamente. Es desaconsejable utilizar mezclas que son demasiado secas para las condiciones de consolidación con las que se cuenta. Estas requerirán gran esfuerzo de consolidación e incluso entonces pueden no estar adecuadamente consolidadas.

Los medios de compactación normalmente empleados en hormigón armado son: *el picado con barra, el apisonado y el vibrado*, aparte de otros métodos especiales como los de *inyección, compactación por vacío y por centrifugación*, y compactado con rodillo, de todos los cuales daremos una ligera descripción.

TABLA 16.1 CONSISTENCIAS Y FORMAS DE COMPACTACIÓN (HORMIGÓN SIN ADITIVOS)

Consistencias	Asentamiento en cono el de Abrams, cm	Altura máxima de la capa, cm	Forma de compactación	Equipos*
Seca	0 a 2	30	Vibrado enérgico en taller	Mecánico de alta potencia
Plástica	3 a 5	30	Vibrado enérgico en obra	Mecánico corriente, especial o combinar
Blanda	6 a 9	50	Vibrado o apisonado	Manuales, Mecánico corriente, especial o combinar
Fluida	10 a 15	50	Picado con barra	Manual o especial
Líquida	≥ 16	-	(No apta para elementos resistentes)	-

* los equipos mencionados corresponden a los siguientes:

1. Mecánico de alta potencia: vibrador externo, pisón mecánico, pisón de compresión, vibrocompresión, etc.
2. Mecánicos corrientes: vibrador de inmersión, vibrador superficial, etc.
3. Especiales: equipos de vacío, de centrifugado, etc.
4. Manuales: varillas, macetas, paletas, etc.

Fuente: Referencia 1

16.2.1. MÉTODOS MANUALES

Los métodos manuales generalmente se utilizan solamente en la colocación de hormigón no estructural.

La **compactación por picado** se efectúa mediante una barra metálica que se introduce en la masa de hormigón repetidas veces, de modo que atraviese la capa que se está consolidando y penetre en la subyacente. Este método se emplea con hormigones de consistencia blanda y fluida, en general en obras de poca importancia. También es indicado para compactar zonas de piezas muy armadas, tales como nudos de ciertas vigas, en los que no se puede compactar por vibrado.



FIGURA 16.1. Pison Manual
Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia

La **compactación por apisonado manual**, se emplea generalmente en elementos de poco espesor y mucha superficie horizontal, con hormigones de consistencia plástica y blanda. Se efectúa mediante golpeteo repetido con un pisón (Figura. 16.1). El hormigón se coloca en capas delgadas de 15 a 20cm de espesor, y cada capa se apisona cuidadosamente. Este es un método eficaz, pero trabajoso y costoso.

16.2.2. MÉTODOS MECÁNICOS

- El método más utilizado para la compactación es la **vibración**, por lo que será el más desarrollado en este capítulo. Esta puede ser interna (vibradores aguja), de superficie (reglas vibratorias), externa (vibradores para el encofrado), o una combinación de estas.
- Los **pisones mecánicos** pueden ser utilizados para compactar el hormigón rígido o seco en elementos prefabricados.
- Las **barras mecánicas** son convenientes para compactar las mezclas secas utilizadas para algunos elementos prefabricados.

16.2.2.1. COMPACTACIÓN POR VIBRADO

El vibrado consiste en someter al hormigón fresco a impulsos vibratorios rápidos que licuan el mortero (figura 16.2) y reducen drásticamente la fricción interna entre las partículas de agregado. En esta condición el hormigón se asienta por acción de la gravedad (ayudado en ocasiones por otras fuerzas). Cuando la vibración cesa, la fricción se reestablece.

El contenido de aire ocluido de un hormigón sin compactar, que es del orden del 15 al 20%, se reduce a un 2 ó 3% después de su compactación por vibrado.



FIGURA 16.2. Vibrador interno liquidificando hormigón de bajo revenimiento
Fuente Referencia 2

16.2.2.1.1. EL PROCESO DE COMPACTACIÓN

La compactación por vibración consiste en dos etapas, la primera consiste en el asentamiento del hormigón, y la segunda en la desaereación (remover las burbujas de aire atrapadas)

1^{era} Etapa: Cuando se comienza la vibración, los impulsos causan un movimiento rápido y desorganizado de las partículas de la mezcla dentro del radio de influencia del vibrador. El mortero se licua temporalmente, la fricción interna, que dio lugar a que se creen cangrejas, se reduce drásticamente, haciendo que el hormigón se comporte como un líquido que contiene partículas suspendidas de agregado grueso. La mezcla llega a ser inestable, y busca una condición más densa, entonces fluye lateralmente hacia el encofrado y alrededor del acero de refuerzo.

Al terminar esta primera etapa, se han eliminado las cangrejas; y los vacíos grandes entre partículas de agregado grueso ahora se llenan de mortero. Sin embargo, el mortero todavía contiene muchas burbujas de aire ocluido, que ocupan un buen porcentaje del volumen del hormigón.

2^{da} Etapa: Después de realizar la compactación a un punto donde el agregado grueso queda suspendido en el mortero, la agitación adicional de la mezcla por vibración hace que las burbujas de aire salgan a la superficie, concluyendo así el proceso de compactación.

16.2.2.1.2. TIPOS DE VIBRADORES

Existen tres tipos de vibradores: internos, de superficie y externos (de mesa o de encofrado). Los primeros, también llamados *vibradores de aguja*, son los más empleados en estructuras que se hormigonan in situ, y su eficacia depende principalmente de su diámetro, frecuencia, y amplitud (tabla 16.2).

Para la construcción de losas muchos tipos de vibradores superficiales están disponibles, incluyendo reglas vibratorias, pisones vibratorios de placa y de rejilla, y herramientas de acabado por vibrado

La acción de los vibradores depende, entre otros factores, de su frecuencia de vibración. Las bajas frecuencias (1500 a 2000 ciclos por minuto) ponen en movimiento los áridos gruesos y necesitan mucha energía; las frecuencias medias (3000 a 6000 ciclos por minuto) ponen en movimiento los áridos finos y requieren menos energía; y las altas frecuencias (12000 a 2.000 ciclos por minuto) afectan al mortero más fino y requieren poca energía, con ellos, el mortero se vuelve líquido y ejerce el papel de lubricante, facilitando la colocación de los áridos en posición de máxima densidad.

Los *vibradores de superficie* disponen de una bandeja a la que está sujeto el vibrador, la cual se mueve por la superficie del hormigón hasta conseguir una apariencia húmeda y brillante en toda ella. Otras veces se trata de una viga o plataforma, más o menos pesada, sobre la que se montan uno o varios vibradores, con lo que se combina la vibración con el peso del conjunto. Este sistema se emplea profusamente en el hormigonado de pavimentos de hormigón (regla vibratoria figura 16.3).



FIGURA 16.3. Reglas vibratorias

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia

Los *vibradores externos* actúan sobre los moldes o encofrados de las piezas (figura 16.4). Es el caso de las *mesas vibrantes* y de los *vibradores de encofrado*, que se fijan rígidamente a los moldes o encofrados, los cuales transmiten la vibración al hormigón. Este sistema es más empleado en prefabricación.

16.2.2.1.3. REGLAS PARA UN BUEN VIBRADO

En las figuras 16.5 se muestran métodos correctos e incorrectos de compactación. Y a continuación se dan reglas que se deben seguir para conseguir un buen vibrado.

- Debe aplicarse de manera metódica para cubrir todas las áreas inmediatamente después de que se deposita el hormigón
- La aguja debe introducirse verticalmente en la masa de hormigón, hasta que la punta penetre en la capa subyacente; debe ser en forma rápida, y después de haberla dejado un breve tiempo debe retirarse con lentitud, para que el hueco que se crea a su alrededor se cierre por completo.

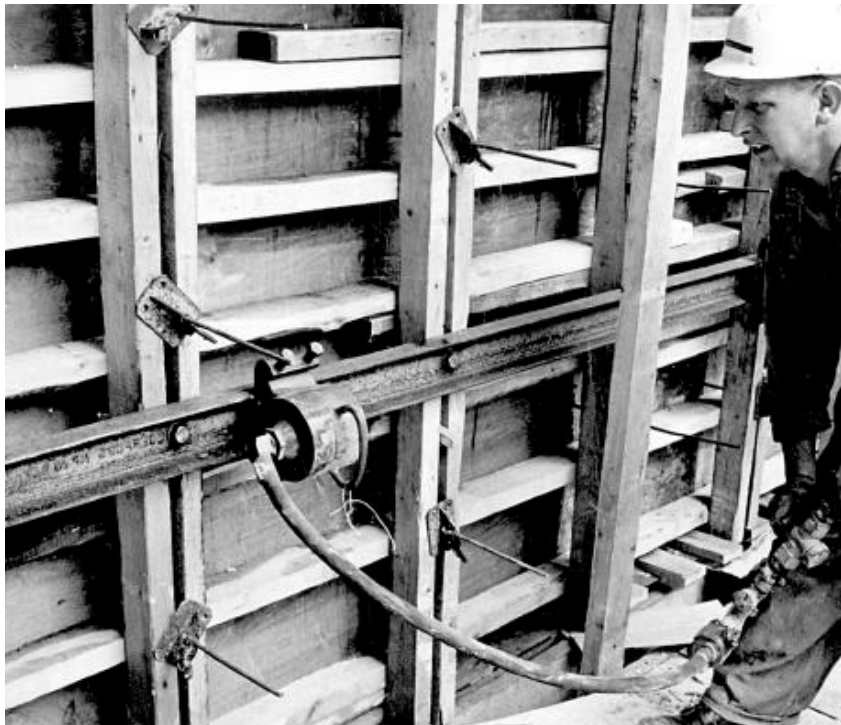


FIGURA 16.4. Vibrador externo o de contacto, sobre el encofrado de un muro

Fuente: Referencia 2

- Los vibradores no se deben utilizar para mover el hormigón lateralmente.
- La distancia entre los puntos de inmersión de la aguja debe ser aproximadamente 1.5 veces el radio de acción (tabla 16.2), y debe ser tal que los campos de acción se superpongan ligeramente.
- Es necesario suspender la vibración cuando en la superficie se forma un sutil estrato de mezcla fina y las grandes burbujas de aire comienzan a aflorar de modo esporádico.
- Si se coloca hormigón “fresco sobre fresco”, el vibrador de aguja debe penetrar a una profundidad de 10-15cm en el estrato inferior para poder asegurar la continuidad y homogeneidad entre los distintos estratos (figura 16.5.c).
- Es mejor vibrar en muchos puntos durante poco tiempo que en pocos durante más tiempo.
- Debe continuarse la vibración hasta que el hormigón se aplane y adquiera un aspecto brillante y deje de subir el aire atrapado. El hormigón vibrado en demasía tendrá mortero en exceso en la parte superior y un aspecto espumoso.
- No debe permitirse que los vibradores golpeen los encofrados, ya que éstos pueden dañarse, lo que da por resultado un feo desperfecto sobre la superficie del hormigón, así como daño en el encofrado en si.

- A veces resulta útil vibrar el refuerzo en zonas congestionadas o inaccesibles, aun cuando no se recomienda que se use en forma regular el sistema de refuerzo para este fin. La mejor forma de llevar a cabo esto es con los vibradores de encofrados.
- La compactación resulta más difícil cuando el hormigón encuentra un obstáculo para que sus granos se reacomoden y alcancen su máxima densidad. Por esta causa, el proceso de consolidación debe prolongarse en el fondo y en las caras de los encofrados y, especialmente, en los vértices y aristas.
- En colocaciones difíciles y obstruidas, se puede además utilizar la vibración del encofrado. En estas circunstancias, se debe evitar el excesivo uso de estos vibradores, que pueden hacer que la pasta se debilite en la superficie en contacto con el encofrado.

En algunos casos, en especial en el hormigón arquitectónico, la vibración se puede complementar con varillado a lo largo del encofrado, en particular en las esquinas o ángulos. Ese varillado, así como la vibración adicional, a veces minimizarán o eliminarán las picaduras (huecos en la superficie). Es infundado el temor de que la vibración abundante o adicional, necesaria para reducir o eliminar las picaduras, influirá de manera adversa sobre la durabilidad del hormigón con aire incluido, debido a la eliminación de parte de ese aire. Esto siempre que ese hormigón haya contenido originalmente la cantidad de aire incluido recomendada para la durabilidad en la ACI 211.1. (tabla 9.1)

Es infundado el temor de que la vibración transmitida al acero de refuerzo sea perjudicial, incluso cuando parte del acero esté empotrado en hormigón parcialmente endurecido. El contacto entre un vibrador y el acero de refuerzo no causará daños a menos que el acero se desplace, (el acero debe estar apoyado y amarrado en forma adecuada para evitar el desplazamiento).

16.2.2.1.4. REVIBRADO

Esta técnica es ideal sobre todo para los hormigones con valores elevados de A/C , con reducida retención de agua o también para aquellos en los cuales la colocación ha sido difícil. Esto mejora su resistencia a la compresión y su adherencia.

No hay evidencia de efectos perjudiciales, por el revibrado, al refuerzo o al hormigón parcialmente curado cuando en un intento de compactación se vacía y vibra hormigón fresco encima.

La condición necesaria para lograr un buen revibrado es que éste sea llevado a cabo en el momento justo, esto es mientras el vibrador en funcionamiento, se hunda en el hormigón por su peso propio. El revibrado es la tarea más difícil y debería ser llevada a cabo por personal especializado.

Volver a vibrar mejorará la resistencia, mejorará la adherencia al acero horizontal de refuerzo al eliminar las bolsas de agua debajo de este, también eliminará las bolsas de aire y de agua y eliminará las grietas por asentamiento que se presentan en la unión de las losas de pisos y columnas.

TABLA 16.2 RANGOS DE CARACTERÍSTICAS, DESEMPEÑO, Y APLICACIONES DE VIBRADORES INTERNOS*

Diámetro de la cabeza, (mm)	Frecuencia Recomendada, vibraciones por min. (Hz) [§]	Valor sugerido de		Valor aproximado del Radio de acción, (mm) [‡]	Aplicación
		Amplitud promedio, (mm)	Fuerza centrífuga, (kg)		
(20-40)	9000-15,000 (150-200)	(0.4-0.8)	(45-180)	(80-150)	Hormigón Plástico y fluido en elementos muy delgados y lugares confinados. Se puede utilizar como complemento para vibradores mas grandes, en especial en trabajo de preesforzado donde los cables y vainas causan congestión en los encofrados. También utilizado para fabricar las muestras para los ensayos de laboratorio.
(30-60)	8500-12,500 (140-210)	(0.5-1.0)	(140-400)	(130-250)	Hormigón Plástico en muros delgadas, columnas, vigas, pilotes pre-fabricados, losas delgadas, y a lo largo de las juntas de construcción. Se puede utilizar como complemento para vibradores mas grandes en áreas confinadas.
(50-90)	8000-12,000 (130-200)	(0.6-1.3)	(320-900)	(180-360)	Hormigón con revenimiento menor a 80mm en construcción común tal como muros, columnas, vigas, pilotes preesforzados, y losas gruesas. Vibración Auxiliar cerca de los encofrados en hormigón en masa y pavimentos.
(80-150)	7000-10,500 (120-180)	(0.8-1.5)	(680-1800)	(300-510)	Hormigón en masa y estructural con un revenimiento de 0 a 50mm depositado en cantidades de hasta 3m ³ en construcción de elementos pesados (centrales eléctricas, grandes pilares de puente, y fundaciones). También como vibración auxiliar en construcción de presas cerca de los encofrados y alrededor de elementos embebidos y acero de refuerzo.
(130-150)	5500-8500 (90-140)	(1.0-2.0)	(1100-2700)	(400-610)	Hormigón en masa en presas de gravedad, pilotes de gran sección, etc. Dos o más vibradores se requerirán simultáneamente para mezclar y compactar cantidades mayores a 3m ³ depositados al mismo tiempo en el encofrado.

§ cuando el vibrador se encuentra dentro del hormigón.

‡ Distancia en la cual el hormigón se encuentra completamente compactado.

* Por lo general hormigones muy secos no responden bien a los vibradores internos.

Fuente Referencia 2

16.2.3. MÉTODOS ESPECIALES

Entre estos podemos citar, en primer término, la **Compactación por Inyección** (ver apartado 20.10). Constituye una técnica delicada, por lo que es conveniente, para efectuar consolidaciones de este tipo, emplear procedimientos ya experimentados.

Otro método especial es la **Compactación por Vacío**, más propia de taller que de obra, que consiste en amasar el hormigón con el agua necesaria para su fácil colocación y, empleando moldes especiales, aspirar después parte del agua mediante ventosas aplicadas al molde y conectadas a una bomba de vacío.

Para la fabricación de tubos de hormigón y otras secciones huecas, se emplea, generalmente, la **Compactación por Centrifugado** en la que, debido a la fuerza centrífuga, los áridos más gruesos son desplazados hacia el exterior, quedando en la cara interna una capa más rica en cemento y, por tanto, más impermeable. Se emplean dosificaciones altas en cemento y relaciones agua/cemento elevadas, ya que el agua sobrante se elimina por la parte interna del tubo.

La **Compactación con Rodillo** (ver apartado 20.3). Este es un sistema que recién empieza a ser explorado en nuestro país.

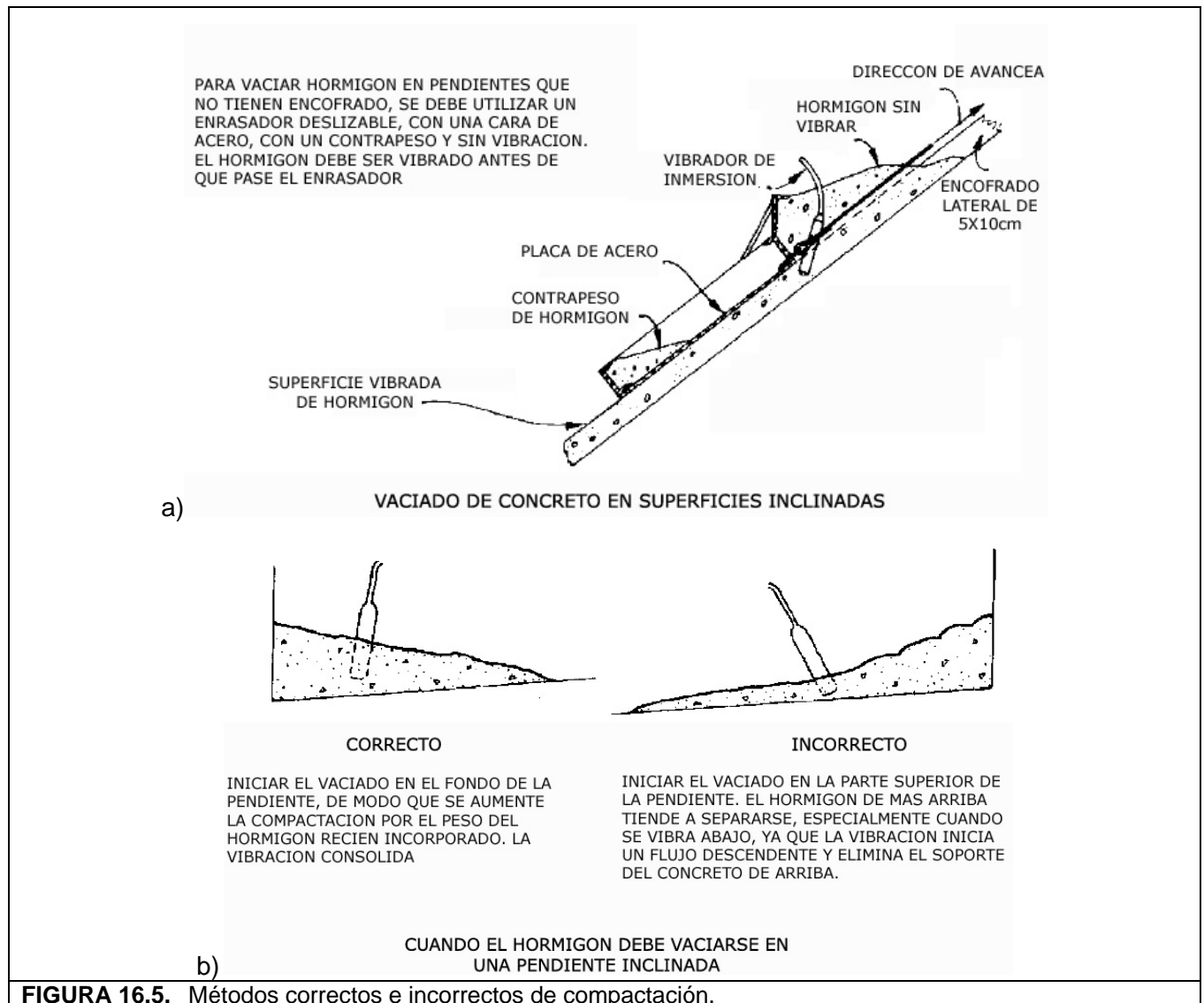


FIGURA 16.5. Métodos correctos e incorrectos de compactación.

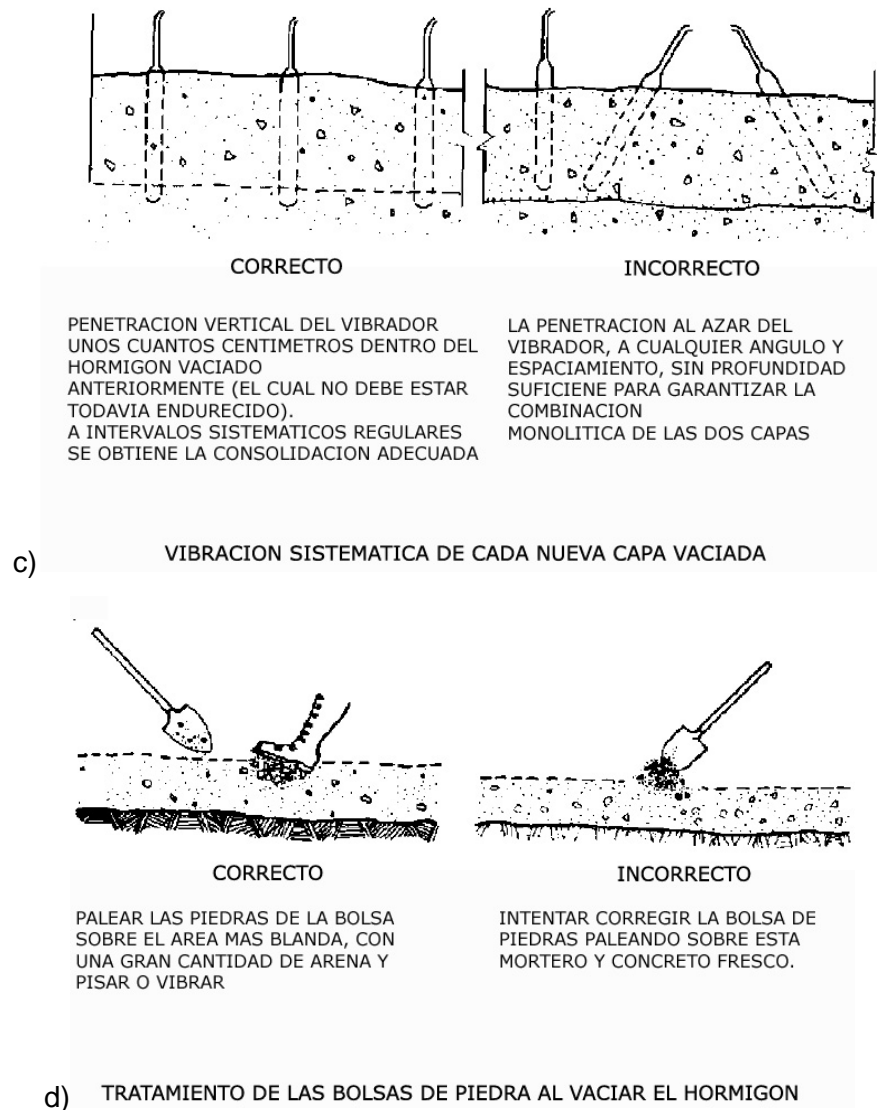


FIGURA 16.5 (Continuación).- Métodos correctos e incorrectos de compactación.

Fuente Referencia 4

16.3. ACABADO

Una vez vaciado el hormigón, se inicia el proceso de nivelación y acabado en las superficies expuestas horizontales; estos pueden ser manuales, mecánicos o ambos.

16.3.1. EMPAREJADO

Inicialmente debe emparejarse, esto consiste en sacar el exceso de hormigón, dejando la superficie en el nivel deseado. El emparejador manual puede tener el borde inferior recto o un poco combado, dependiendo de la superficie especificada. Este debe deslizarse lentamente hacia delante, a través del hormigón, en movimientos cortos laterales, asemejando el movimiento de un serrucho. Las emparejadoras pueden encontrarse combinadas con vibradores, a esta combinación se denomina regla vibratoria (figura 16.6 b).

16.3.2. APLANADO

Después de emparejar, se realiza una nivelación adicional por medio de una aplanadora, que puede ser de mango largo (figura 16.6), para cortar las protuberancias y rellenar los huecos. Estas pueden ser de madera, si se trata de hormigón sin aire incluido) y deben ser de una aleación de magnesio o aluminio (si se trata de hormigón con aire incluido); no se usan hojas de acero porque tienden a sellar la superficie, evitan la evaporación del agua de exudación y producen burbujas superficiales o superficies débiles.

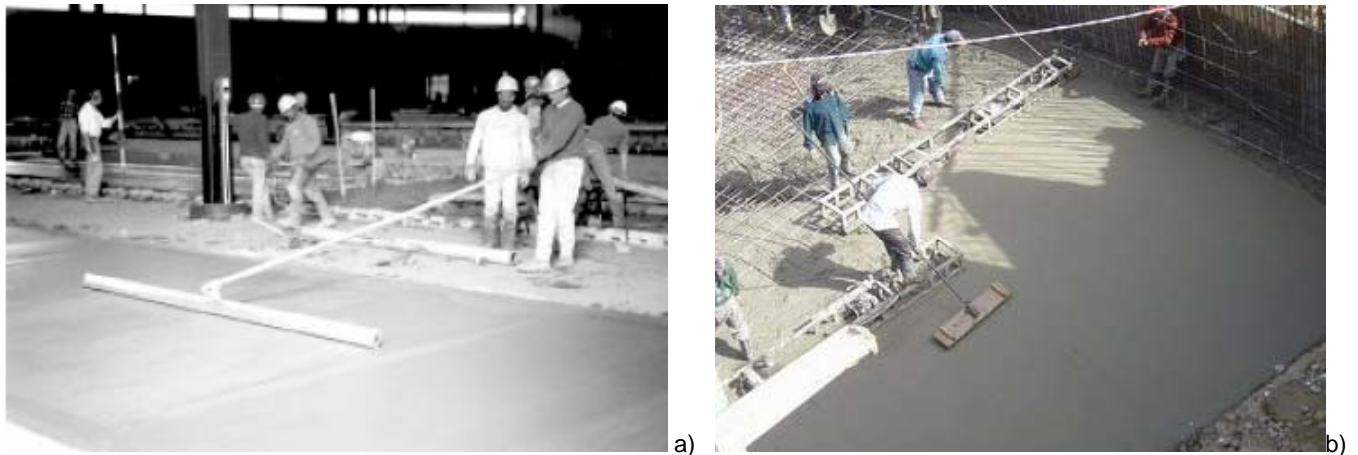


FIGURA 16.6. a) Acabado de una losa con aplanadora de mango largo, utilizada par alcanzar lugares que no se pueden llegar con el brazo b) Acabado de un pavimento con regla vibratoria y luego aplanadora de madera.

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente a) Referencia 3 y b) Propia

Recomendación.- El compactado, nivelado y aplanado, deben ser realizados antes de que exista un exceso de agua de exudación.

Las operaciones anteriores, deben haber nivelado, formado y alisado la superficie. Aunque algunas veces no se requiere mayores trabajos de acabado, en la mayoría de las losas, el aplanado es seguido de una o más de las siguientes operaciones de acabado: canaleado de juntas y aristas, frotachado, planchado, rastrillado o cepillado y otros tipos de texturizados. Antes de iniciar estas operaciones, es necesario que el hormigón haya endurecido un poco. La superficie estará lista para iniciar estas operaciones cuando el agua exudada se haya evaporado y cuando la presión de un pie deje una impresión de solo 6mm en el hormigón.

16.3.3. FROTACHADO

Este se realiza con un frotacho de mano (figura 16.7) o mecánico (figura 16.8). El frotachado tiene 3 propósitos: 1) Incrustar las partículas del agregado debajo de la superficie, 2) remover las ligeras imperfecciones, protuberancias y vacíos, 3) compactar el mortero de la superficie a modo de preparación a las siguientes operaciones de acabado. Esta operación no debe realizarse en exceso, ya que esto puede atraer exceso de agua y finos a la superficie, resultado en defectos superficiales posteriores. El frotacho manual puede estar hecho de madera, magnesio o fibra de vidrio. El frotachado produce una textura

relativamente pareja (pero no lisa) que es antideslizante y que a menudo se utiliza como un acabado final, especialmente para losas exteriores.



FIGURA 16.7. Frotachado manual.

Fuente: Referencia 6



FIGURA 16.8. Frotachado mecanizado con una maquina rotatoria doble

Fuente: Referencia 3

16.3.4. PLANCHADO (figura 16.9)

Donde se desee una superficie lisa, dura y densa, el frotachado debe ser seguido de un planchado con plancha de metal. El planchado no debe realizarse en una superficie que no ha sido frotachada. Espolvorear cemento en una superficie húmeda, para quitar el exceso de agua, es una mala práctica y puede causar agrietamiento, cuando se presenta esta situación, esperar a que el agua se evapore o quitarla. El hormigón en exteriores no debe ser planchado por muchas razones, 1º puede llevar a una perdida de aire incluido, causado por un sobre trabajado en la superficie y 2º las superficies planchadas pueden ser resbalosas cuando están húmedas. Frotachar y cepillar o rastrillar son suficientes para superficies de exterior.



FIGURA 16.9. Planchado

Fuente Referencia 6

16.3.5. CEPILLADO O RASTRILLADO

Debe realizarse antes de que el hormigón haya endurecido demasiado, pero debe estar lo suficientemente duro para conservar la impresión y así producir una superficie antideslizante. Una impresión rustica puede ser lograda con un rastrillo, un cepillo de alambre o un cepillo de fibras gruesas y duras. Esta operación es posterior al frotachado. En las losas, usualmente se realiza de forma transversal al tráfico principal.



FIGURA 16.10. Rastrillado.

Fuente Referencia 6

Precaución.- Una de las principales causas de los defectos en la superficie de las losas de hormigón, como ser fisuramiento, superficie polvorienta o escamosa, es por haber realizado el acabado cuando todavía estaba presente el agua de exudación. Si el agua de exudación es reintroducida en el hormigón en el proceso de acabado, la relación A/C se incrementa significativamente, lo que produce una reducción en la resistencia, en el contenido de aire incluido y la permeabilidad de la superficie. Realizar el frotachado y planchado antes de que haya terminado el proceso de exudación, puede también atrapar agua de exudación por debajo de la superficie terminada, produciendo una zona debilitada o vacía, debajo de la superficie terminada, esto algunas veces resulta en laminaciones.

16.3.6. TEXTURAS SUPERFICIALES

Se pueden aplicar diversas texturas sobre la superficie acabada para satisfacer las necesidades de servicio. Estas pueden ser acabado con cepillo, con escoba, con púas, ranurado, con rastra de yute, arremolinado, aplanado o diferentes texturas y colores como se mostrarán en la figura 16.11.

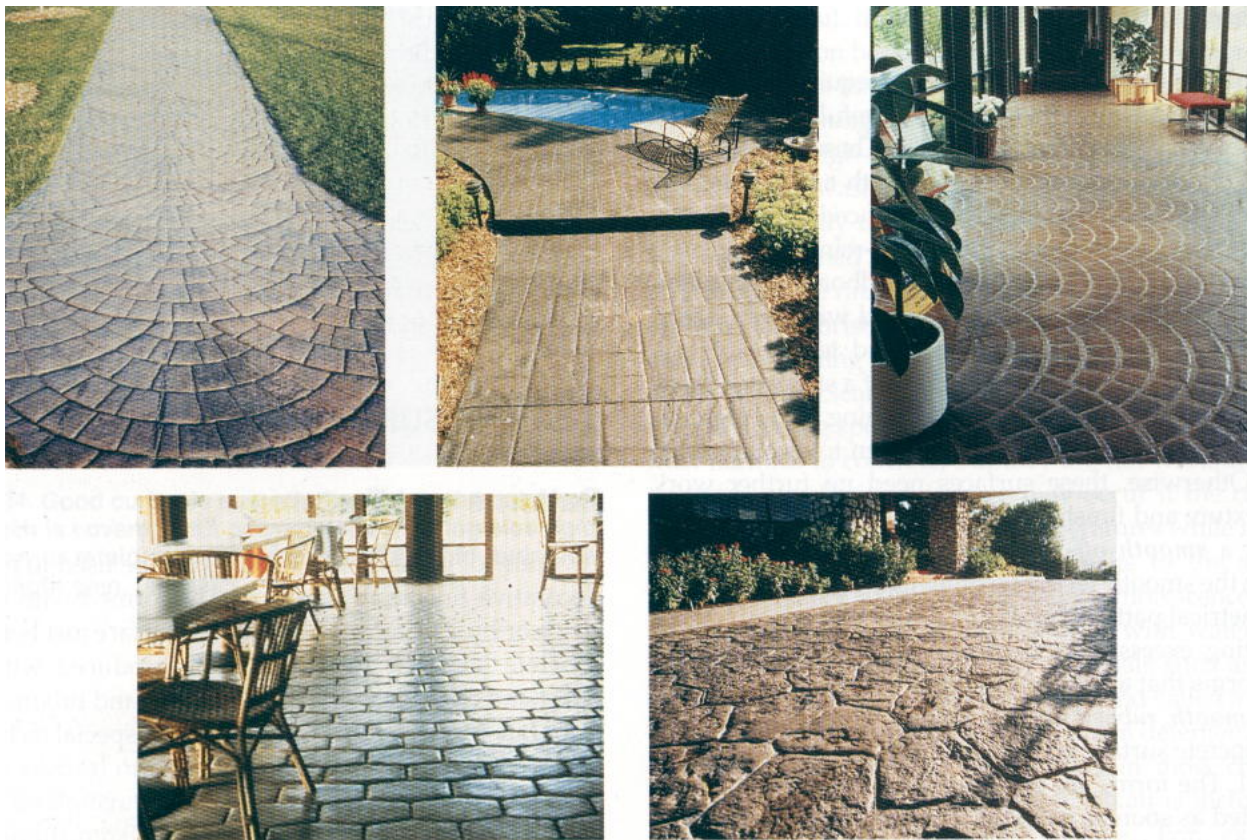


FIGURA 16.11. Texturizados

Fuente Referencia 6

En la figura 16.12 se mostrara una secuencia completa de acabado:

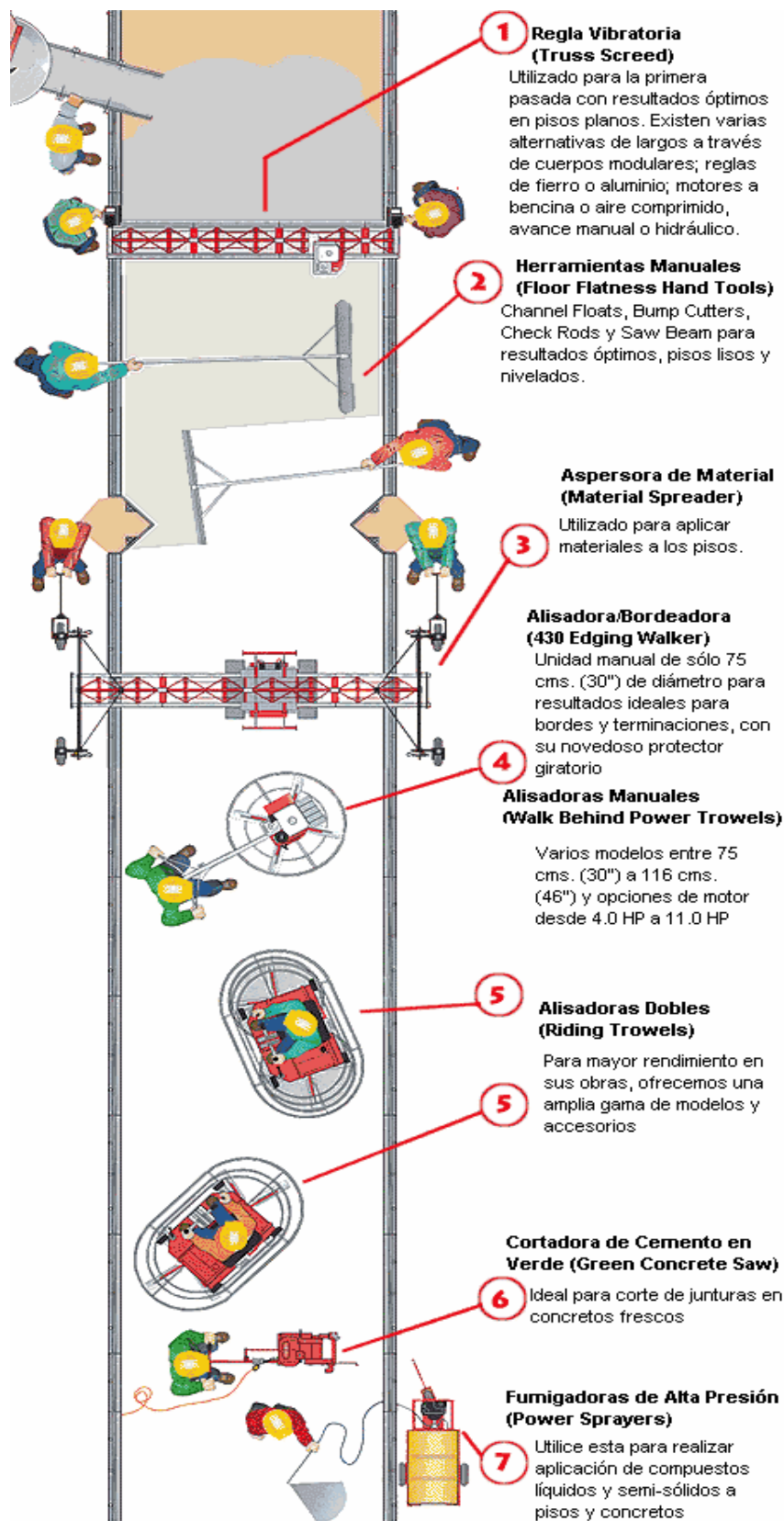


FIGURA 16.12. Secuencia de Acabado

Fuente: www.kellytractor.com

BIBLIOGRAFÍA

1. NB 604:1994 Hormigones – Requisitos.
2. ACI 309R-96 Guide for Consolidation of Concrete.
3. ACI 302.1R-96 Guide for Concrete Floor and Slab Construction
4. ACI 304R-00 Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete.
5. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) "Manual de la Construcción con Concreto". 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
6. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association "Design and Control of Concrete Mixtures". 14ª ed., www.portcement.org
7. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

CAPITULO 17

JUNTAS

17.1. JUNTAS EN EL HORMIGÓN

El hormigón experimenta normalmente cambios pequeños en sus dimensiones. Este cambio de volumen suele ser resultado de la contracción del hormigón endurecido a medida que este se seca, de la expansión o contracción debido a los cambios de temperatura, o sea, como resultado de la exposición al ambiente, o por la aplicación de cargas u otras circunstancias (ver apartado 10.1)

Por otra parte, todo elemento de hormigón se encuentra sujeto a algún tipo de restricción del movimiento, ya sea por causas internas (barras de refuerzo) o externas (unión con otros elementos, fundaciones).

Debido a los cambios de volumen y a las restricciones de la estructura, se desarrollan esfuerzos de tracción en el hormigón que exceden la resistencia a la tracción o la capacidad de deformación de este, produciéndose agrietamientos en las estructuras (figura 17.1).



FIGURA 17.1 Grieta formada en una Losa de Hormigón.

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia.

En la mayoría de las estructuras de hormigón, estos efectos son desagradables desde un punto de vista estructural y visual, por este motivo se crean planos debilitados para que de esta forma la fisura ocurra en ese lugar, el cual puede ser de menor importancia o tener poco impacto visual.

Estos planos debilitados se denominan **Juntas**, las cuales facilitan los movimientos debidos a cambios de volumen sin la pérdida de la integridad de la estructura.

Las Juntas limitan la magnitud de fuerzas, de los movimientos y el agrietamiento, dividiendo los edificios en segmentos individuales. Se pueden también requerir juntas para facilitar la construcción sin tener ningún propósito estructural, que es el caso de las juntas de hormigonado, que permiten que el trabajo pueda ser retomado después de un período de tiempo.

Los tres tipos reconocidos de juntas son: las juntas de Contracción, de Dilatación o Aislamiento y de Hormigonado. El tipo y la instalación de estas quedan determinados por el diseño de la estructura, el método de construcción y el uso esperado de la instalación.

17.2. TIPOS DE JUNTAS Y SU FUNCIÓN

17.2.1. JUNTAS DE CONTRACCIÓN

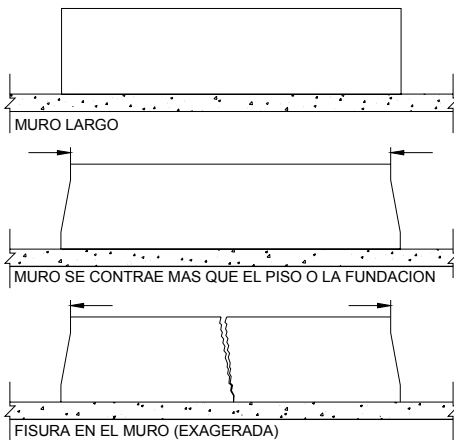


FIGURA 17.2 Fisuras de un muro largo debido a la Contracción

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 2



FIGURA 17.3 Grieta formada a lo largo del patrón de la junta. Nótese que la grieta sigue el plano de la junta.

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Propia

Como ya se dijo anteriormente la contracción por secado y los descensos de temperatura provocan esfuerzos de tracción en el hormigón, si el elemento tiene restricciones aparecerán grietas cuando estos esfuerzos alcancen la resistencia a la tracción del hormigón, y como esta última es muy baja, el agrietamiento es muy frecuente; este patrón de comportamiento se ilustra en la figura 17.2.

Las juntas de contracción proporcionan planos debilitados para que las grietas se formen, en una zona de poca importancia estructural, o de poco impacto visual, evitándose grietas irregulares y de mal aspecto. Se crean con la confianza de que, si ocurre una grieta será a lo largo del patrón geométrico de la junta (figura 17.3).

Esta junta se logra reduciendo la sección en un 25% como mínimo, para asegurarse que sea bastante débil para que la grieta por contracción se forme en ese lugar.

Esto se puede lograr: **1.**insertando tiras de metal, plástico o madera en el hormigón cuando el hormigón es vaciado, que posteriormente podrán ser retiradas una vez que el hormigón fragüe, **2.**formándolas con una herramienta especial durante el proceso de acabado o **3.**cortando el hormigón tan pronto como haya endurecido (ver apartado 7.4).

En cuanto al refuerzo, se puede cortar 5cm antes de la junta, o se puede dejar que pase un 50% o menos; para asegurar la impermeabilidad, en ambos casos, se pueden usar Waterstops, que son una barrera flexible contra agua que se coloca a través de la junta.

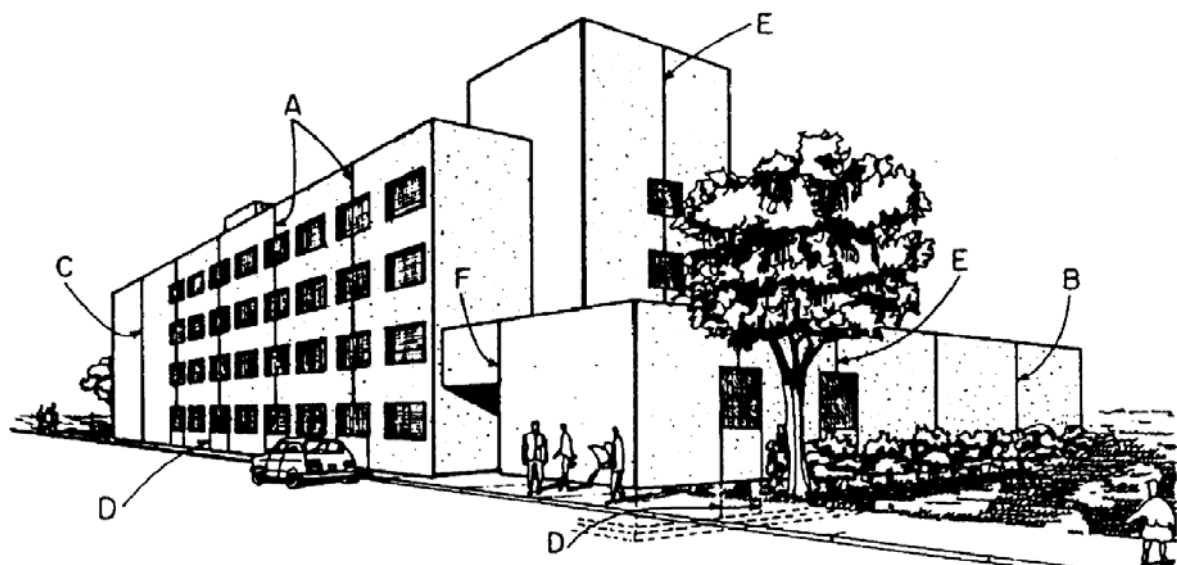
Se pueden encontrar diversos criterios que a veces resultan contradictorios sobre el espaciamiento de las juntas. En la tabla 17.1 se dan recomendaciones para juntas de contracción.

TABLA 17.1 ESPACIAMIENTO PARA LAS JUNTAS DE CONTRACCIÓN

Autor	Espaciamiento
Merrill (1943)	6m para muros con aberturas frecuentes, 7.5m en muros sin aberturas.
Fintel (1974)	4.5 a 6m para muros y losas sobre el terreno. Se recomienda colocar las juntas en cambios bruscos en planta y en cambios en la altura del edificio en consideración a las fuertes concentraciones de esfuerzos.
Wood (1981)	6 a 9m para muros
PCA (1982)	6 a 7.5m para muros dependiendo el número de aberturas.
ACI 302.1R	24 a 36 veces el espesor de la losa.
ACI 350R-83	9m en estructuras sanitarias.
ACI 350R	Varia con la cantidad y el grade de encogimiento y el refuerzo por temperatura.
ACI 224R-92	1 a 3 veces la altura del muro en muros llenos.

Fuente: Referencia 2

La figura 17.4 muestra las recomendaciones de la Asociación del Cemento Pórtland, de Estados Unidos, para las posiciones de las juntas de contracción en muros de hormigón.



- A. 6m de separación en muros con aberturas frecuentes (ventanas o puertas)
- B. Nunca más de 6m de separación en muros sin aberturas.
- C. Entre 3 a 5m de una esquina, si es posible.
- D. En línea en cada extremo de la abertura, en el primer piso.
- E. Por encima de la abertura, al centro de esta.
- F. Son preferibles en los extremos de la abertura.

FIGURA 17.4 Ubicación de las juntas de contracción en edificios según recomendación de la Asociación de Cemento Pórtland.

Fuente: Referencia 2



FIGURA 17.5 Juntas de Contracción en un muro de contención.

Distribuidor de la Muyurina, Cochabamba
Fuente: Propia

Estas juntas se utilizan principalmente para dividir elementos estructurales largos y relativamente delgados, como por ejemplo pavimentos rígidos, losas sobre el terreno, muros, en paneles más pequeños (figura 17.5).

Para mantener cualquier agrietamiento en anchos muy finos y eliminar las juntas de contracción, se pueden considerar los cambios de volumen como el efecto de otra carga en el diseño de la estructura, calculando el refuerzo que soporte esta carga.

17.2.2. JUNTAS DE DILATACIÓN O AISLAMIENTO

Como se explico anteriormente, todos los edificios están restringidos en cierto grado, estas restricciones inducirán esfuerzos producidos por los cambios de temperatura, los cuales son proporcionales a estos.

La magnitud de las fuerzas desarrolladas y la cantidad de movimiento causado por los cambios de volumen, debido a cambios de humedad y temperatura, se relacionan directamente con la longitud de la estructura.

La junta de dilatación es una discontinuidad en el refuerzo y en el hormigón; por lo tanto, esta es eficaz tanto para la expansión causada por las variaciones de temperatura como para la contracción.

La junta separara toda la estructura por encima de la fundación (figura 17.6), resultando que en el lugar de la junta se tendrán pórticos iguales a cada lado de la junta, pero las columnas de estos pórticos compartirán una misma zapata, para evitar que se presenten asentamientos diferenciales (figura 17.7)

El espacio dejado para la junta se deben cubrir (Figura. 17.8) y pueden dejarse vacías o sellarlas con algún material comprimible para evitar que la junta se atasque con tierra y se vuelva ineficaz. Para tener impermeabilidad se debe colocar una barrera flexible contra agua a través de la junta (Waterstop). (ver apartado 7.3.2).



FIGURA 17.6 Junta de Dilatación. Edificio Multifuncional U.M.S.S.

Fuente: Propia

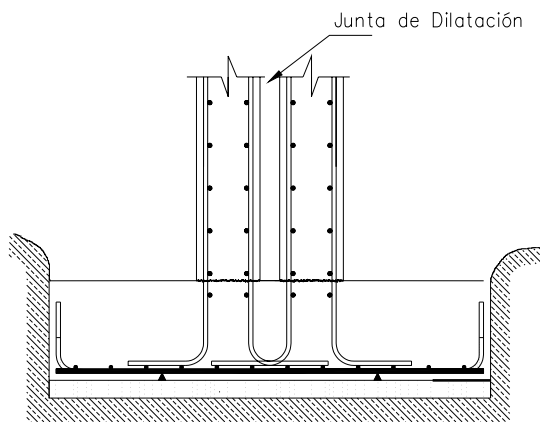


FIGURA 17.7 2 columnas compartiendo la misma zapata.

Fuente: Elaboración Propia

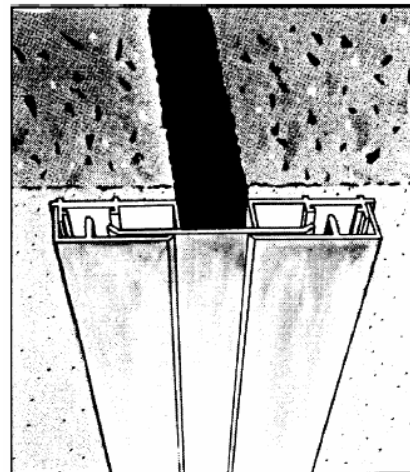


FIGURA 17.8 Tapajuntas en una junta de expansión de un muro.

Fuente: Referencia 2

Si se desea transferencia de carga a través de la junta, como en el caso de pavimento rígido, se deben ahogar barras de acero entre las partes separadas por la junta, pero que permitan el movimiento (figura 17.9). Los extremos deslizables de las barras deben estar alojados en una tapa o protección metálica o plástica de ajuste preciso, a fin de dejar espacio para el movimiento de la barra durante la expansión del hormigón (figura 17.10).



FIGURA 17.9 Barras de acero para transferencia de carga en una losa de calzada del distribuidor vehicular de la Muyurina.

Fuente: Propia

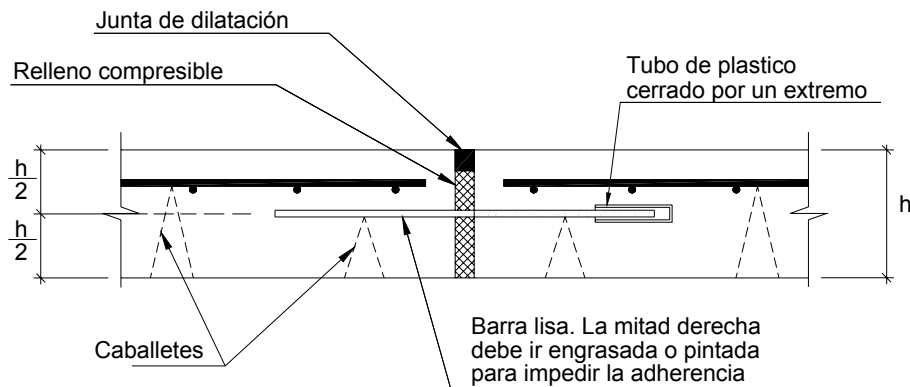


FIGURA 17.10 Barras de acero para transferencia de carga en una losa

Fuente: Elaboración Propia

El ancho de la junta debe ser el suficiente como para evitar que las caras del edificio entren en contacto. La variación máxima de temperatura debe ser utilizada en la determinación de este ancho, siendo la dilatación causada por esta variación directamente proporcional al ancho de la junta.

Una estimación de la dilatación o de la contracción causada por la variación de temperatura es obtenida con la ecuación 17.1:

$$\Delta L = \frac{1}{2} \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (\text{E.17.1})$$

Donde:

α = coeficiente de expansión térmica, para hormigón se asume: $\alpha = 9.9 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$

L = longitud de la estructura

$$\Delta T = \frac{2}{3} (T_{\max} - T_{\min}) + T_s$$

$$T_s = 17^\circ\text{C}$$

La ecuación 17.1, funciona para un pórtico con ambos extremos libres (sin restricción de desplazamiento), en caso de que un extremo este arriostrado (restringido al desplazamiento), el resultado se debe multiplicar por 2.

T_{\max} y T_{\min} , se refieren a las temperaturas extremas en un solo día, según registro. Se añade una caída en la temperatura de 17°C , a cuenta de la contracción por secado.

El ancho de la junta varia entre 2.5 a 15 cm siendo 5 cm un valor típico.

Ejemplo.- un edificio de 42m, situado en una zona donde la temperatura máxima y mínima registrada en un solo día es de 30°C y 3°C respectivamente, entonces utilizando la ecuación 17.1:

$$\Delta L = \frac{1}{2} \cdot 9.9 \times 10^{-6} \cdot \frac{1}{^\circ\text{C}} \times 4200[\text{cm}] \times \left[\frac{2}{3} (30 - 3) + 17 \right] = 0.73\text{cm} \approx 1.00\text{cm}$$

\therefore El ancho de la junta será de 1.00cm. en caso de que ambos extremos de la estructura no tengan restricciones, y 2.00cm en caso de que ambos extremos tengan alguna restricción.

17.2.2.1. UBICACIÓN DE LA JUNTA

No existe una regla para la determinación de la longitud máxima que puede tener una estructura, sin necesitar una junta de dilatación, sin afectar a su integridad estructural o serviciabilidad.

En la tabla 17.3 se dan recomendaciones para los espaciamientos, entre juntas de expansión, dados por varios autores. Alternativamente existen métodos analíticos, como el de Martin y Acosta para edificios de un solo piso, y el método de la *Academia Nacional de Ciencias* para edificios de uno o varios pisos, ambos explicados en la ACI 224.3R.

TABLA 17.2 ESPACIAMIENTO PARA LAS JUNTAS DE EXPANSIÓN

Autor	Espaciamiento
Lewerenz (1907)	23m para muros
Hunter (1953)	25m para muros y techos cubiertos, 9 a 12m para techos sin cubierta.
Billig (1960)	Longitud máxima para un edificio sin juntas 30m. se recomienda colocar las juntas en cambios bruscos en planta y en cambios en la altura del edificio en consideración a las fuertes concentraciones de esfuerzos.
Wood (1981)	30 a 35m par muros.
Indian Standards Institution (1964)	Longitud máxima entre juntas de un edificio 45m.
PCA (1982)	Longitud máxima para un edificio sin juntas 60m.
ACI 350R-83	36m en estructuras sanitarias parcialmente llenas con líquidos (se requieren menores espaciamientos cuando no contienen líquidos)

Fuente: Referencia 2

Se considera una buena práctica el ubicar estas juntas en las siguientes situaciones:

- Donde los muros o losas cambian de geometría, tanto en planta, como ser en estructuras con forma de “L”, “T”, “Y” y “U”; como en elevación. (figura 17.11)
- En cambios abruptos de espesor
- En cambios en el tipo de construcción, como en una losa de pavimento de un puente y la losa de la carretera.

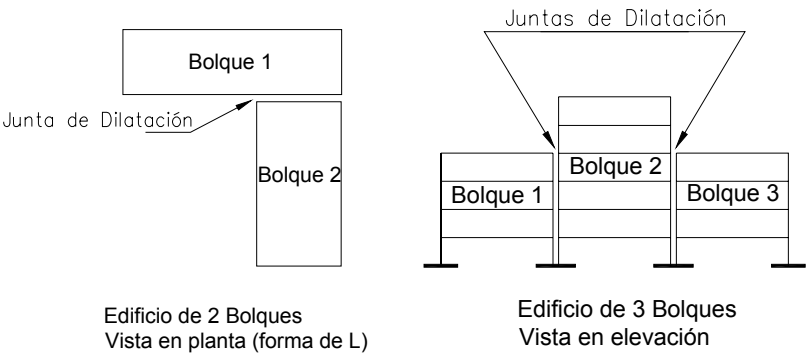


FIGURA 17.11 Juntas de dilatación en cambios de geometría
Fuente: Elaboración Propia

Las juntas de dilatación en las bases de las columnas pueden ser circulares o cuadradas, como se muestra en la figura 17.12.

La junta cuadrada usualmente se rota formando un diamante, de manera que los vértices del cuadrado intersecten las juntas de contracción. Si no se rotara, se propagarían fisuras radiales desde las esquinas, por lo que seria necesario refuerzo adicional en las esquinas para restringir la formación de fisuras.

La forma de construcción es dejar esta abertura, circular o cuadrada, abierta mientras se vacía la losa y luego rellenarla con hormigón una vez que esta haya endurecido.

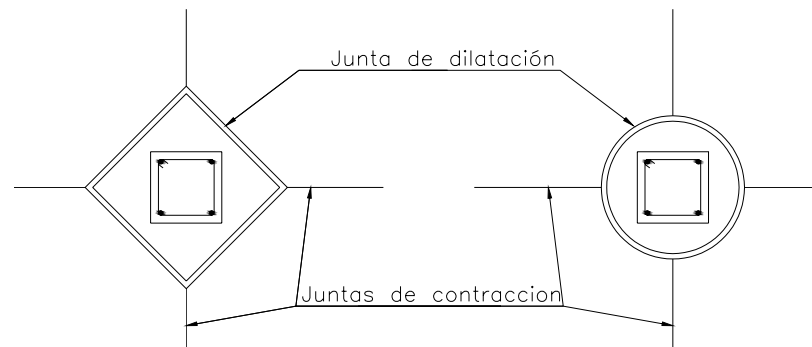


FIGURA 17.12 Junta de dilatación en la base de columnas

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 2

17.2.3. JUNTAS DE HORMIGONADO O DE CONSTRUCCIÓN

La cantidad de hormigón que puede ser vaciado de una sola vez, depende de la capacidad de la mezcladora, la cantidad de personal, el ciclo de reutilización del encofrado y del tiempo del que se dispone, por lo que en muchos casos no es posible vaciar el hormigón de forma continua. Por lo tanto las juntas de hormigonado son necesarias para organizar la secuencia de vaciado por partes, por ejemplo cada piso de un edificio o losas muy grandes.

Esta junta es la unión creada entre la interrupción de un vaciado y la continuación de este. Dependiendo del diseño estructural es posible que se requiera que las juntas de hormigonado tengan la función de juntas de expansión o de juntas de contracción; o que sean monolíticas, esto es cuando se realiza el segundo vaciado bien unido al primero para mantener una completa integridad de la estructura.

Las juntas de hormigonado pueden ser horizontales o verticales dependiendo de la secuencia de vaciado requerida, el diseño y el tipo de estructura.

17.2.3.1. REQUISITOS PARA LA CONSTRUCCIÓN.

No está demás recordar que un hormigón no dosificado adecuadamente presentará un exceso de exudación que dejará una capa débil y porosa sobre la superficie, la cual dará lugar a una mala adherencia con la siguiente capa.

Para alcanzar una buena unión impermeable entre un hormigón viejo y uno nuevo, se deben cumplir algunas condiciones, antes de la colocación del hormigón fresco, entre las que se encuentran las siguientes:

- El hormigón endurecido debe estar limpio.
- Si solamente transcurrieron algunas horas desde el ultimo vaciado, solo será necesaria una revisión visual para asegurarse no hay partículas sueltas ni suciedad.
- El hormigón nuevo estará unido adecuadamente al hormigón endurecido, siempre y cuando se vibre vigorosamente.
- Uniones con una diferencia de tiempo mayor, necesitan una preparación superficial adicional:
- Mientras el hormigón sigue estando lo suficientemente suave tal que la capa superficial de mortero pueda ser removida, pero lo suficientemente duro como para no permitir que el agregado se suelte; se limpia con agua a presión o con un cepillo de alambre.
- Si el hormigón ya ha endurecido, se debe preparar la superficie usando un chorro de arena húmeda o de agua a alta presión.
- Debido a que la zona de la junta es una zona débil, se puede poner una capa previa de Hº con mas arena, menos grava, más cemento (No usar lechada) y con menor relación A/C, antes de vaciar el nuevo Hº, lo que le dará mayor resistencia a la junta. Debe ser de 10 a 15cm de espesor y ser vibrada junto con la mezcla nueva que se vaciara contiguamente a esta. El agregado debe ser menor de 20mm, un agregado más grande no es aconsejable. La colocación de esta capa se puede prescindir en las losas.
- El hormigón existente debe ser humedecido antes de la colocación del hormigón fresco, debido a que el Hº antiguo absorberá el agua del Hº nuevo, pero sin dejar charcos de agua en la superficie, ya que el agua superficial libre aumentará la relación A/C del hormigón nuevo y debilitara la unión. Si el hormigón ya existente ha sido vaciado recientemente, no requerirá el agua adicional, pero si este ya ha secado puede requerir la saturación por un día o más.
- Se pueden usar aditivos especiales, como ser adhesivos Epoxi, para reforzar esta unión. El uso de aditivos no es necesario si la junta se realiza de un día a otro.

En nuestro medio se pueden encontrar este tipo de aditivos en la línea SIKA, con sus productos Sikadur y Colmafix, cuya descripción técnica se presentan en el Anexo 1.

17.2.3.2. UBICACIÓN DE LA JUNTA

En hormigón estructural se usan juntas de hormigonado verticales, usualmente en losas, y juntas de hormigonado horizontales, en columnas. La junta se debe ubicar en el lugar donde menos afecte la integridad estructural del elemento.

La posición de esta depende del tipo de elemento y capacidad de hormigonado, por esta razón, vigas y losas serán tratadas por separado de columnas y muros.

Vigas y losas.- La junta debe ser vertical y situarse en los puntos de cortante mínimo o de inflexión (de igual manera si la superficies es inclinada), estos puntos están generalmente localizados a la mitad o en el tercio central del tramo como se ilustra en la figura 17.13.

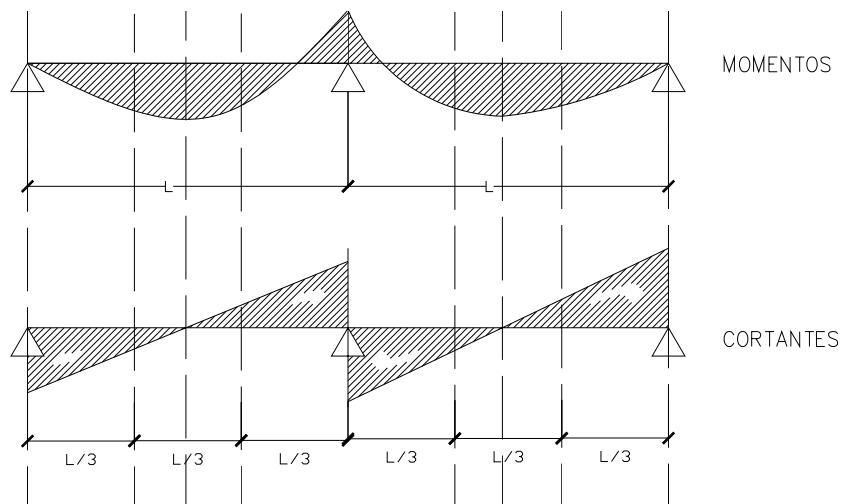


FIGURA 17.13 Diagrama de Momentos y Cortantes. Puntos de Cortantes mínimo o puntos de inflexión y Momentos máximos

Fuente: Elaboración Propia

No se recomiendan juntas horizontales en vigas, comúnmente se vacían monolíticamente las vigas junto con las losas; excepto en el caso de que la viga sea de gran canto, donde se recomienda vaciar la viga hasta la base de la losa, y luego vaciar la losa (en este caso se formaría una junta horizontal) (figura 17.14), esto debido a que se presentaría agrietamiento en la unión, por el mayor encogimiento vertical que ocurre en una viga de este tipo cuando se vacía de una sola vez. Con este procedimiento existe la posibilidad de que, en la junta, haya un deslizamiento entre las dos caras, debido al esfuerzo de corte horizontal, por lo que en este caso se requiere que se provea del refuerzo adecuado para absorber el cortante.

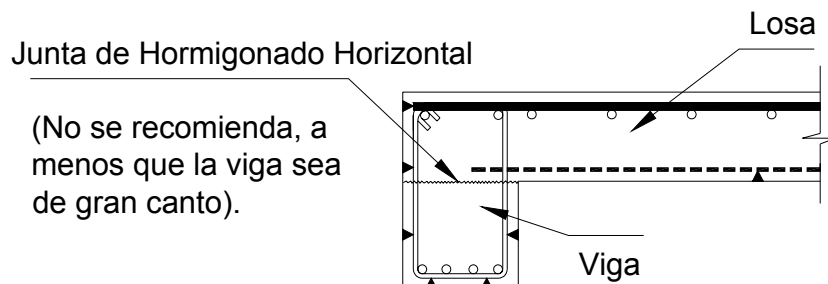


FIGURA 17.14 Junta de hormigonado Horizontal entre una losa y una viga.

Fuente: Elaboración Propia

La preocupación principal en la formación de estas juntas es proporcionar transferencia de corte y continuidad en la flexión a través de estas.

- La **continuidad en la flexión** se logra manteniendo el refuerzo a través de la junta con una longitud suficiente, para asegurar un buen empalme entre el refuerzo.

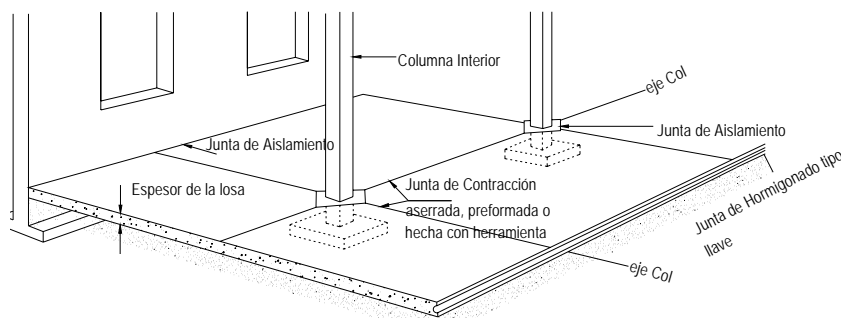


FIGURA 17.15 Ubicación y tipos de juntas en una losa de Hormigón.

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 2

- La **transferencia de corte** es proporcionada por la fricción de corte entre el hormigón viejo y el nuevo. Esta unión y el refuerzo que cruza la junta, son suficientes para proporcionar la transferencia necesaria del esfuerzo de corte, si se sigue un apropiado procedimiento de hormigonado.

La ubicación de los distintos tipos de juntas en una losa son ilustradas en la figura 17.15

Columnas y Muros.- Lo usual es limitar el vaciado de columnas y muros a la altura de un piso, por lo que la junta se ubicara en la parte inferior de la viga; y en la parte superior de la losa, para continuar las columnas del piso siguiente (figura 17.16), de igual forma para los muros de Hormigón.

En caso que se vaya a vaciar columnas, muros, vigas y losas el mismo día, el hormigón de las columnas y muros se debe dejar asentar por lo menos 2 horas antes del vaciado de los elementos que van encima de estas. Esto para evitar las grietas entre la columna, viga y la losa por la contracción vertical de las columnas y muros previamente vaciados.

De la misma forma que en losas y vigas el refuerzo se debe continuar a través de la junta, para transmitir los esfuerzos.

Una columna no debe tener juntas, en medio.

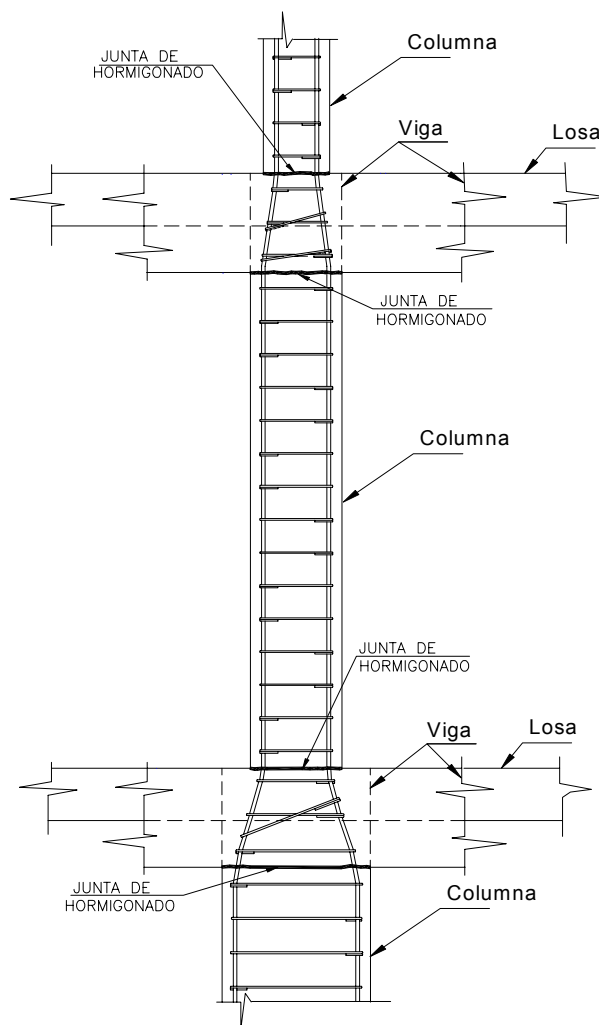


FIGURA 17.16 Ubicación de las juntas de hormigonado entre vigas, losas y columnas.

Fuente: Elaboración Propia

17.3. SELLANTES PARA JUNTAS

La función específica de los sellantes para juntas es la de prevenir la intrusión de líquidos, sólidos o gases y la de proteger al hormigón contra cualquier daño; también deben soportar las repetidas contracciones y expansiones a las cuales esta sujeta la junta y la exposición al calor, frío, humedad, rayos de sol y a veces ataque de químicos agresivos. Estas condiciones imponen requerimientos especiales en las propiedades de los materiales y los métodos de instalación.

17.3.1. PROPIEDADES REQUERIDAS PARA LOS SELLANTES PARA JUNTAS

Para un comportamiento satisfactorio los sellantes para juntas deben:

- Ser relativamente impermeables.
- Deformarse para acomodarse al movimiento que ocurre en la junta.
- Suficiente recuperación de sus propiedades y forma original después de las deformaciones cíclicas.
- Debe estar adherida a las caras de la junta y no fallar en la adhesión y no desintegrarse en las esquinas u otras áreas locales por las concentraciones de esfuerzos.
- No romperse internamente (fallar en cohesión)
- No deslizarse por la acción de la gravedad (o presión de algún fluido)
- No alcanzar una consistencia inaceptable, a altas temperaturas.
- No endurecerse hasta volverse inaceptablemente quebradizo, a bajas temperaturas.
- No verse adversamente afectado por envejecimiento, clima u otros aspectos de las condiciones de servicio durante su vida útil.
- Poder ser remplazado al final de una razonable vida útil, si falla durante la vida útil de la estructura.

Los Sellantes para juntas que atraviesan la junta, como por ejemplo los waterstops, requieren las mismas propiedades.

17.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SELLANTES PARA JUNTAS

Se pueden clasificar en 2 grupos:

1. **Sellantes para juntas moldeados en Campo:** Son aplicados en forma líquida o semilíquida como relleno de juntas. Se utilizan por lo general en juntas de contracción, en pavimentos para carreteras y aeropuertos.

A continuación nombraremos los más comunes:

- Mastics: Masillas.
- Aplicaciones térmicas en caliente: por lo general a base de asfalto, son muy usadas en juntas de pavimentos rígidos y en techos de edificios.
- Aplicaciones térmicas en frío: emulsiones de vinilo y acrílico. Son usados en canales y tanques.
- Aplicaciones térmicas químicas: son aplicadas en forma líquida y curadas por una reacción química hasta el estado sólido. Soportan mayores movimientos y tienen mayor vida útil. Por ejemplo la silicona y los materiales epoxicos.

En nuestro medio se pueden encontrar este tipo de sellantes en la línea SIKA, con sus productos Sikaflex y Sikafix. Una descripción completa de cada uno de ellos se encuentra en el anexo 1.

2. **Sellantes prefabricados para juntas:** Pueden ser rígidos o flexibles. La mayoría de los sellantes para juntas rígidos son metálicos. Los flexibles son usualmente de gomas naturales o sintéticas.

- Waterstops rígidos: están hechos de acero, cobre y ocasionalmente de plomo. Primordialmente usados en presas y otras construcciones pesadas. (figura 17.17)
- Waterstops flexibles: hechos de Butilo, Neopreno, gomas naturales y PVC que es el tipo más usado. Son usados en estructuras que contienen o protegen de líquidos. (Tabla 17.3)

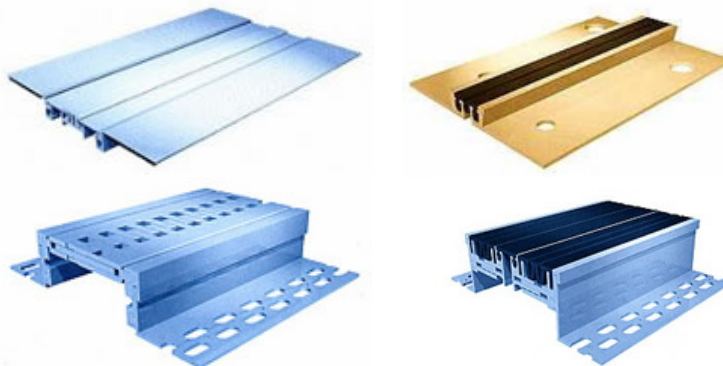





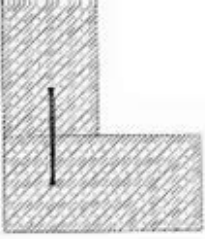





FIGURA 17.17 Waterstops metálicos

Fuente: Referencia 4

En nuestro medio se pueden encontrar en la línea Sika los siguientes productos, waterstops flexibles “*Cintas PVC Sika*” y Cintas flexibles para sellado de juntas y grietas “*Sikadur Combiflex*”

Una descripción completa de este se encuentra en el anexo 1.

TABLA 17.3 TIPOS DE WATERSTOPS Y SUS APLICACIONES

Forma	Ubicación	Aplicación
	 Externo	Juntas de hormigonado.
	 Interno	Juntas de hormigonado y Contracción.
 Con varillas de refuerzo de acero		
	 Interno	Juntas de Dilatación.
	 Externo	Juntas de dilatación.

Fuente: Referencia 4

- **Plastoformo:** Se utilizan paneles de plastoformo del espesor y forma que se requiera. Se utilizan en juntas de dilatación. Se colocan adhiriéndolos con alquitrán a una superficie ya endurecida y luego se continua el vaciado (figura 17.18)



FIGURA 17.18 Plastoformo en juntas de dilatación.
Distribuidor de la Recoleta, Cochabamba

Fuente: Propia

17.4. MÉTODOS PARA LA REALIZAR JUNTAS

Existen 4 métodos para crear juntas en la superficie del hormigón, ya sean de expansión, contracción o hormigonado, estos son: con encofrado, con herramientas, con sierra y con moldes formadores de junta.

17.4.1. JUNTAS CON ENCOFRADO

Se utilizan en juntas de hormigonado. Consiste en un encofrado metálico, del alto y largo de la losa, de manera que la forma de será la de la junta. Estas se utilizan en losas, muros y pavimento rígido (figura 17.19).



FIGURA 17.19 Junta de hormigonado con Encofrado, en forma de Llave

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Elaboración Propia

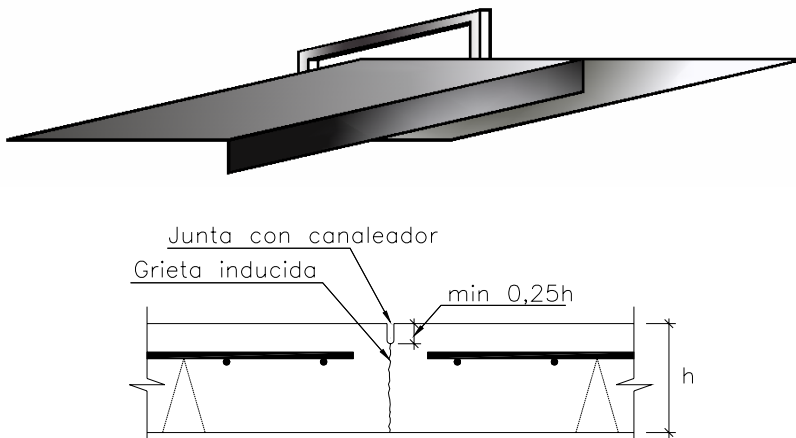


FIGURA 17.20 Canaleador

Fuente: Elaboración Propia

17.4.2. JUNTAS HECHAS CON HERRAMIENTAS

Se utilizan en juntas de contracción, se hace la junta, durante el acabado, en la superficie del hormigón con una herramienta llamada canaleador (figura 17.20).

17.4.3. JUNTAS HECHAS CON SIERRA

Método utilizado en juntas de contracción, que consiste en hacer el canal de la junta mediante el aserrado de la superficie del hormigón, con una sierra eléctrica (figura 17.21). El hormigón debe haber endurecido lo suficiente para evitar el desmoronamiento de los bordes durante el corte. El mejor momento para realizar el aserrado de las juntas es cuando la temperatura del hormigón (elevada debido al calor de hidratación) es mayor. En todo caso, las juntas deben ser aserradas tan pronto como sea posible. Si hay un retraso en cortar la losa y ya ha ocurrido una contracción significativa entonces una grieta se formará delante de la sierra, como consecuencia de las tensiones acumuladas.

17.4.4. JUNTAS HECHAS CON MOLDES FORMADORES DE JUNTA

Estos moldes se colocan en el hormigón fresco durante las operaciones de colocación y acabado o se instalan dentro del encofrado antes del vaciado del hormigón. Estos moldes se utilizan para crear juntas de expansión o de contracción (figura 17.22).

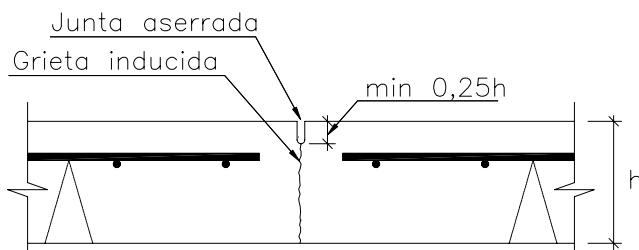


FIGURA 17.21 Aserrado de junta en una losa de hormigón.

Distribuidor de la Muyurina - Cochabamba
Fuente: Elaboración Propia.

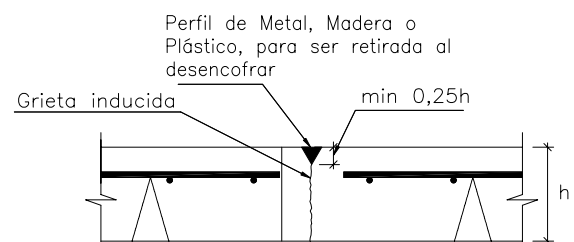


FIGURA 17.22 Perfil formador de juntas en un muro de H^oA^o

Fuente: Elaboración Propia.

BIBLIOGRAFIA

1. ACI 504R-90 (Reapproved 1997) Guide to Sealing joints in Concrete Structures.
2. ACI 224 3R -95 (Reapproved 2001) Joints in Concrete Construction.
3. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) "Manual de la Construcción con Concreto". 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
4. <http://www.mjuk.co.uk>.
5. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

CAPITULO 18

CURADO

18.1. DEFINICIÓN Y NECESIDAD

El curado es el procedimiento usado para garantizar que existe suficiente agua presente en el hormigón para dar lugar a una hidratación continua del cemento. Tiene una influencia significativa en las propiedades del hormigón endurecido como ser: Resistencia, Permeabilidad, Resistencia a la Abrasión, estabilidad de Volumen y Resistencias a la Congelación y Deshielo

El hormigón gana resistencia a través del proceso químico de hidratación, al secarse cesa esta reacción creándose una serie de huecos o capilares que disminuyen su resistencia. Por ejemplo, el hormigón curado en húmedo alcanzará en 7 días, alrededor del 45% de su resistencia a los 90 días, en 14 días alcanzará el 70% y en 28 días el 80%. El secado del hormigón en estas primeras etapas limitará severamente la ganancia de resistencia ya que, una vez seco, la ganancia de resistencia será muy poca.

La figura 18.1 ilustra el efecto de la aplicación de curado en la ganancia de resistencia.

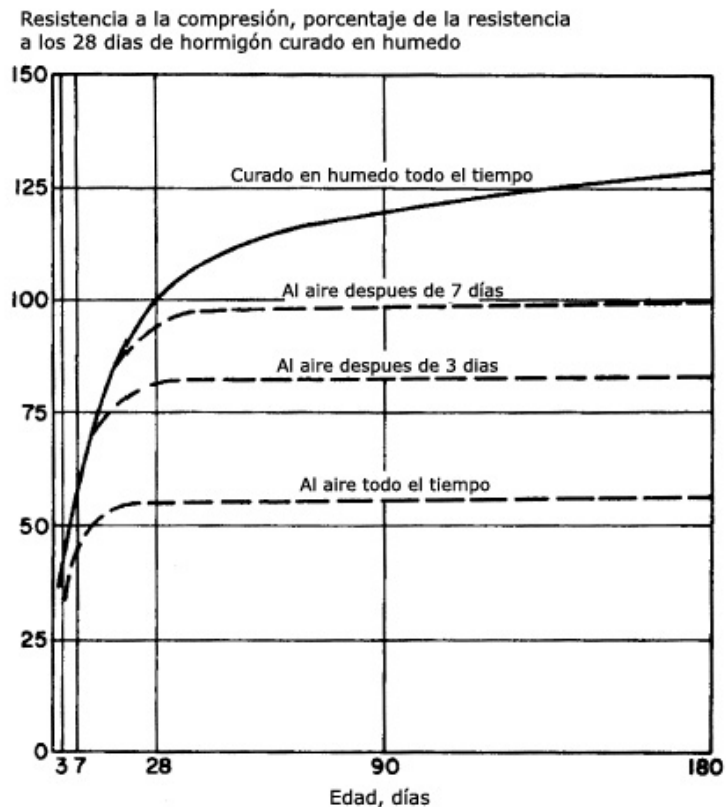


FIGURA 18.1 Resistencia a la compresión de cilindros de 15x30cm en función al envejecimiento para diferentes condiciones de curado.

Fuente: Referencia 1

Las figuras 7.7 y 7.8 muestran como afecta en la ganancia de resistencia el discontinuar el curado en húmedo o reanudarlo después de un periodo en el aire.

El hormigón pasa por cambios de volumen en ciclos alternados de humidificación y secado, se contrae al secarse y se expande al humedecerse. Si el hormigón se seca y humedece alternadamente cuando está recién vaciado puede presentarse agrietamiento, en especial en la superficie, debido a que la resistencia a la flexión se desarrolla con lentitud. Por lo tanto, el curado debe ser continuo desde el momento en que se ha vaciado hasta que haya alcanzado la calidad deseada, para evitar estos cambios perjudiciales de volumen. ***La humidificación y el secado alternados pueden hacer más daño que si no se realizara ningún curado en lo absoluto.***

Si el H^o se vuelve a saturar luego de un periodo de secado, la hidratación se reanuda y la resistencia vuelve a aumentar, aunque se debe tener en cuenta que el hormigón es difícil de restaurar.

Las capas exteriores de hormigón, son las más sensibles a una falta de curado. El núcleo de las piezas (salvo que sean muy delgadas) mantiene el contenido de humedad durante un periodo prolongado, y se ve menos afectado por la falta de curado que las capas superficiales. En consecuencia, de no curarse bien el hormigón, la capa de recubrimiento de las armaduras resultará porosa y permeable, con lo que la vida útil de la estructura se verá gravemente mermada.

En ciertas condiciones de humedad relativa baja, de fuerte viento o de energía radiante del sol, o con cualquier combinación de éstas, es posible, sobretodo en losas de hormigón, que mientras el interior todavía está plástico, la superficie del hormigón se seque, endurezca y se contraiga antes de que haya tenido lugar el fraguado, lo que puede causar agrietamiento en la superficie. A este tipo de agrietamiento se denomina ***Agrietamiento Plástico***. La aplicación inmediata del curado o de cualquier método, después de la última operación de acabado evita este tipo de agrietamiento. La figura 18.2 ilustra este fenómeno.

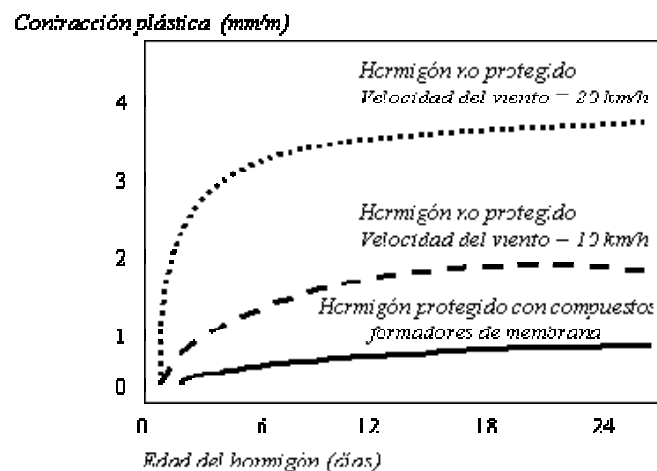


FIGURA 18.2 Diferencia entre un hormigón protegido y uno no protegido y con la presencia de viento, respecto a la aparición de agrietamiento plástico.

Fuente: Referencia 5

Como cualquier pérdida de humedad en el hormigón dará por resultado un perjuicio en la resistencia o agrietamiento superficial, el curado debe comenzar, sin importar el método, tan pronto como se quite el encofrado o, en el caso de losas, tan pronto como la superficie no resulte dañada por el procedimiento de curado.

La duración e intensidad del curado dependen, fundamentalmente, de la temperatura y humedad del ambiente, así como de la acción del viento y de la exposición directa al sol.

Como idea general y para unas condiciones medias diremos que, con cemento Pórtland normal y para elementos de hormigón armado, **el período de curado mínimo debe ser de 7 días**, plazo que puede reducirse a la mitad si el cemento es de alta resistencia inicial, o si se utilizan aditivos aceleradores. Por el contrario, hay que aumentarlo a 15 días cuando se trate de cementos de ganancia lenta de resistencia.

Cuando se vacía en tiempo seco o cuando los elementos de hormigón van a estar en ambiente agresivo, los períodos de curado anteriormente citados deben aumentarse en un 30%.

El curado debe proteger al hormigón de:

- Agrietamiento plástico debido al viento, al sol, al frío seco.
- Temperaturas extremas (calor – frío y grandes amplitudes térmicas).
- Intemperie.
- Acción prematura de sustancias nocivas como aceites, y otras.

18.2. MÉTODOS DE CURADO

El método aplicado y la duración del curado dependen esencialmente del ambiente circundante y del tipo de hormigón. Las distintas condiciones del medio ambiente pueden alterar las propiedades del hormigón fresco, lo cual también modificará las propiedades del hormigón endurecido.

Existen tres tipos principales de curado:

- 1) Aplicación de agua directamente o a través de algunos materiales que mantengan un depósito de agua en contacto con la superficie
- 2) Métodos basados en la retención de la humedad.
- 3) Curado al vapor

En general, los métodos que aportan agua resultan más eficaces que los que impiden su evaporación.

18.2.1. MÉTODOS DE CURADO BASADOS EN LA APLICACIÓN DE AGUA

El agua que es adecuada para usarse en el mezclado del hormigón es adecuada para el curado.

Aplicación directa de Agua. La aplicación de agua a las superficies de hormigón es el medio ideal de curado, ya que esta cubierta de agua evita cualquier pérdida de humedad del hormigón. El agua se puede administrar por roció continuo o, en el caso de losas planas, por la formación de estanques, usando arena alrededor del borde reteniendo $\pm 2\text{cm}$ de agua sobre la superficie.

Yute, arpillera, mantas de algodón y otras cubiertas de materiales absorbentes. Pueden mantener el agua en superficies horizontales o verticales. Éstos materiales deben estar libres de sustancias dañinas, tales como azúcar o fertilizante, o sustancias que pueden decolorar el hormigón. Para quitar estas sustancias, se deben lavar muy bien antes de ser colocarlas sobre el hormigón.

Cuanto más grueso es el yute, absorberá más agua y necesitará ser mojado con menos frecuencia. Traslapar las tiras en la mitad de su ancho da mayor retención de humedad y previene su desplazamiento durante vientos o lluvias fuertes. No se debe dejar secar, ya que cuando se seca, puede absorber la humedad de la superficie del hormigón.

Las mantas de algodón y fibras similares se usan de igual manera que el yute excepto que su peso hace que sea necesario usar previamente una cubierta de yute más ligero o una niebla de agua hasta que el hormigón haya fraguado lo suficiente como para soportar la acción del peso de las mantas húmedas, que podrían producir daños en la superficie.

Arena, Aserrín o Tierra.- Se aplica con éxito si se mantienen saturados y si no hay sales o sustancias presentes que dañen o manchen el hormigón. Los materiales granulares deben observarse para ver que no se sequen al punto de que estén absorbiendo humedad del hormigón, en lugar de suministrársela. Nunca se debe usar aserrín de roble, debido al ácido tánico que contiene.

Paja.- Es aceptable como medio para curado, dispersa hasta dar una profundidad de 15cm o más, y saturada por completo con agua. Existe la posibilidad de que sea arrastrada por el viento, a menos que se detenga por medio de otra cubierta como yute o papel. La ventaja especial de la paja es su valor aislante contra el calor y el frío.

18.2.2. MÉTODOS BASADOS EN LA RETENCIÓN DE LA HUMEDAD.

Compuestos líquidos formadores de membrana (ASTM C309; C1315). En el caso de grandes superficies (pavimentos, losas, etc.), el curado por aportación de humedad se sustituye a menudo por el empleo de productos de curado, que protegen la superficie del hormigón e impiden la evaporación

del agua interna del mismo. Se emplean para ello distintos tipos de recubrimientos a base de aceites, resinas, plásticos, etc. Se aplica en la superficie del hormigón fresco (figura 18.3)



FIGURA 18.3 Aditivo formador de membrana de curado.
Nótese el color blanco que deja el compuesto sobre el pavimento
Distribuidor de la Recoleta Cochabamba.

Fuente: Propia

Al evaporarse el solvente, estos compuestos dejan una membrana que reduce la evaporación del agua de la superficie del hormigón. Estos compuestos se encuentran pigmentados en forma clara, en blanco, gris ligero o negro. Conviene que los productos sean coloreados para poder apreciar su reparto.

- Los compuestos para curado de membrana clara o pigmentada en gris, se usa en los casos en donde se quieren evitar las manchas.
- Los compuestos de membrana blanca se utilizan cuando las temperaturas ambiente son altas, debido a que el pigmento actúa como reflector evitando la absorción de la energía solar.
- Los compuestos de membrana negra se utilizan sobre elementos estructurales no expuestos al sol o en tiempo frío, donde la energía solar tenderá a calentar el hormigón.

En nuestro medio estos productos se pueden encontrar dentro de la línea Sika, e sus productos Sika Cure y Antisol, la descripción técnica de estos se encuentra en el Anexo 1.

Láminas de papel y plástico. (ASTM C171).- Estas láminas se aplican al hormigón el momento en que su aplicación ya no causa daño a la superficie del mismo. La función de estas láminas es la misma que la de los compuestos líquidos formadores de membrana. Las láminas de plástico se encuentran reforzadas con hilos de nylon o con respaldo de papel. Tienen la ventaja de que el hormigón no se mancha por su uso; sin embargo, tienen la desventaja de que es necesario fijarlas en su posición para evitar que el viento las desprenda. En los climas calientes, resulta conveniente una lámina pigmentada en blanco. Las hojas reforzadas han probado resultar más económicas, ya que se pueden volver a utilizar varias veces.

18.2.3. CURADO AL VAPOR

Es ventajoso cuando la ganancia temprana de resistencia del hormigón es importante o cuando calor adicional es requerido para completar la hidratación, como por ejemplo en tiempo frío.

Dos métodos de curado al vapor son utilizados: vapor directo a presión atmosférica (para estructuras cerradas vaciadas en sitio y unidades grandes prefabricadas) y vapor a alta presión en autoclaves (para unidades pequeñas manufacturadas).

Un ciclo de curado al vapor típico consiste en ① un retraso previo inicial a la aplicación de vapor, ② un periodo para incrementar la temperatura, ③ un periodo para mantener una temperatura máxima constante y ④ un periodo para disminuir la temperatura. Un ciclo típico de curado al vapor a presión atmosférica es mostrado en la figura 18.4.

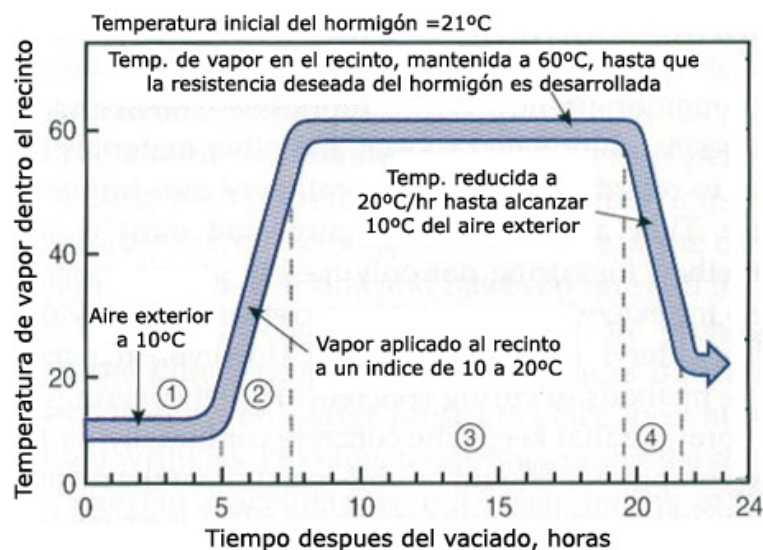


FIGURA 18.4 Ciclo Típico de curado a vapor

- | | |
|---|------------------|
| ① Retrazo inicial previo a la aplicación de vapor | de 3 a 5 horas |
| ② Periodo de incremento de temperatura | 2½ horas |
| ③ Periodo de temperatura constante | de 6 a 12 horas* |
| ④ Periodo de disminución de la temperatura | 2 horas |

* Cemento tipo III (alta resistencia inicial), mayor para otros tipos.

Fuente: Referencia 6

El curado a vapor a presión atmosférica es generalmente realizado en un recinto cerrado para minimizar las pérdidas de calor y humedad. Lonas u otro material son utilizados para formar el recinto. La aplicación de vapor en el recinto, debe ser retrasada hasta que el fraguado inicial ocurra o retrasarlo por lo menos 3 horas después del vaciado final del hormigón, para permitir cierto endurecimiento del hormigón. Sin embargo, de 3 a 5 horas de periodo de retraso para la aplicación de vapor puede conseguir una máxima resistencia inicial, como se muestra en la figura 18.5.

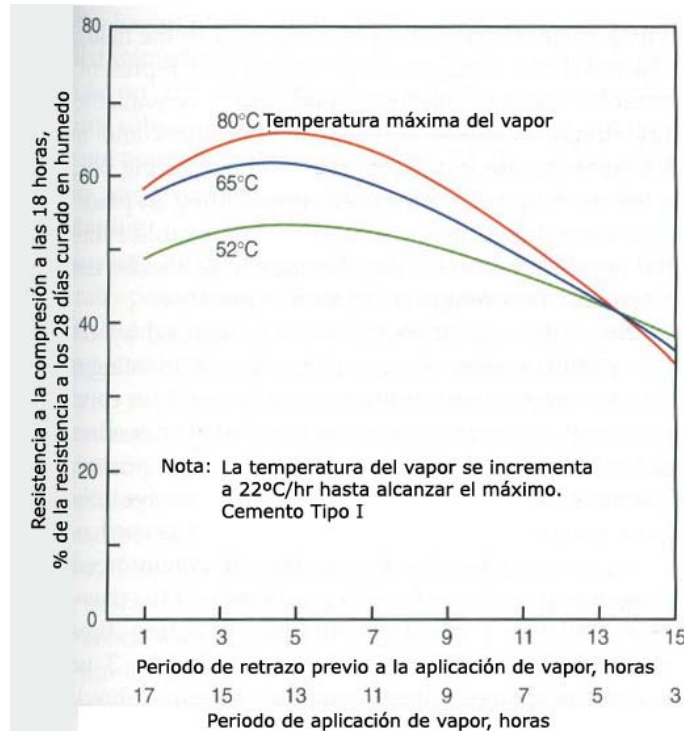


FIGURA 18.5 Relación entre la resistencia a la 18 horas y el periodo de retraso previo a la aplicación de vapor. En cada caso, el periodo de retraso más el periodo de aplicación de vapor, totalizan 18 horas.
Fuente: Referencia 6

La temperatura del vapor en el recinto debe ser mantenida cerca de los 60°C, hasta que la resistencia deseada del hormigón se haya desarrollado. La resistencia no se incrementara significativamente si la temperatura máxima del vapor es aumentada de 60°C a 70°C. Temperaturas de curado al vapor arriba de los 70°C deben evitarse, estos son antieconómicos y pueden resultar en un daño. Es recomendado que la temperatura interna del hormigón no exceda los 70°C para evitar expansión posterior inducida por calor y reducción excesiva en la resistencia final.

Monitorear solamente la temperatura del aire no es suficiente debido a que el calor de hidratación puede causar que la temperatura interna del hormigón exceda los 70°C.

Además de la ganancia temprana de resistencia, existen otras ventajas del hormigón curado a temperaturas de alrededor de 60°C, por ejemplo, se reduce la retracción por secado, a comparación del hormigón curado a 23°C por 28 días.

Excesivos índices de calentamiento y enfriamiento deben ser evitados para prevenir daños por cambios de volumen. Las temperaturas en el recinto que rodea al hormigón no debe aumentar o disminuir más de 22°C a 33°C por hora, dependiendo del tamaño y forma del elemento de hormigón.

La temperatura de curado en el recinto debe ser mantenida hasta alcanzar la resistencia deseada. El tiempo requerido dependerá de la mezcla de hormigón y de la temperatura del vapor en el recinto.

18.3. PRECAUCIONES DURANTE EL CURADO

Mientras no se han concluido los procesos de curado y endurecimiento del hormigón, es necesario evitar cualquier causa externa que pueda agrietarlo, tales como sobrecargas, choques o vibraciones excesivas, originadas por los trabajos de construcción del resto de la obra. Ejemplos típicos de lo dicho son las acumulaciones de material, las vibraciones que originan algunas máquinas auxiliares de obra y los impactos involuntarios que puedan producirse sobre soportes u otros elementos.

Si no es posible evitar este tipo de acciones, deberán protegerse adecuadamente las piezas, así como sus bordes y aristas.

18.4. TEMPERATURA Y CURADO

18.4.1. CURADO EN CLIMA FRÍO

En tiempo frío, el control de la humedad del hormigón debe ir acompañado de un control de la temperatura.

El curado mediante la aplicación de humedad es beneficioso solo si se el hormigón húmedo es protegido contra la congelación. El curado con agua requiere la construcción temporal de un ambiente calido.

El índice de evaporación de una superficie de hormigón fresco, puede ser mayor en tiempo frío que en tiempo calido, debido a que este, por lo general, esta acompañado de vientos con velocidades promedio muy grandes. Para minimizar que se produzca Agrietamiento Plástico y para mantener la hidratación del cemento, en hormigón vaciado en tiempo frío, debe mantenerse con un contenido alto de humedad dentro la superficie.

Para los procesos acostumbrados de curado, se debe realizar un esfuerzo especial para conservar el hormigón húmedo y dentro de una temperatura de 10 a 25°C.

18.4.2. CURADO EN CLIMA CALIDO

Clima calido incluye desde clima templado y húmedo que puede ser benigno para el curado hasta el ambiente más hostil, caliente y seco. En este tipo de ambientes es crítico mantener la humedad adecuada en el hormigón y bajo tales condiciones el agua de curado se puede evaporar tan rápido que requiere ser remplazada constantemente.

Previamente al curado, se debe cuidar que el hormigón previamente vaciado o que el encofrado, no absorba la humedad del hormigón nuevo. Esto se puede lograr rociando previamente con agua la superficie que va a estar en contacto con el hormigón nuevo, lo que también disminuirá la temperatura de estas superficies.

Los métodos de curado iniciales se deben aplicar inmediatamente después de vaciar el hormigón, y antes y durante el proceso de acabado. Esto para disminuir la evaporación del agua de exudación o para reponer la misma

El índice de evaporación se reduce mediante pantallas protectoras contra viento o pantallas solares, y con la aplicación de una niebla húmeda que incrementa la humedad del aire sobre el hormigón.

Un curado final se puede aplicar una vez que la superficie no será dañada por la aplicación de materiales de curado o por la aplicación de agua.

En clima calido, la necesidad de curado continuo es mayor durante los primeros días después de vaciado el hormigón.

18.4.3. DIFERENCIAS EXTREMAS DE TEMPERATURA

Es necesario evitar someter al hormigón aun sin endurecer a considerables amplitudes térmicas entre el núcleo y la superficie.

La tabla 18.1 muestra una selección de medidas de protección capaces de defender al hormigón de los saltos de temperatura.

TABLA 18.1 MEDIDAS PARA EL CURADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA EXTERNA.					
MEDIDAS A TOMAR	Temperatura externa en °C				
	< -3	- 3 a + 5	+5 a +10	+10 a +25	> +25
Cubrir las superficies expuestas, aplicar una membrana de curado o mantener la humedad mediante regado continuo. Superficies encofradas: mantener la humedad del encofrado de madera, proteger los encofrados metálicos contra la insolación directa.				X	X
Cubrir las superficies expuestas o aplicar una membrana de curado.			X	X	
Cubrir las superficies expuestas, aplicar una membrana de curado. Protección térmica necesaria. Superficies encofradas: aplicar una protección térmica.		X			
Aislar las superficies expuestas y calentar o aplicar una protección térmica. La temperatura del hormigón debe ser mantenida por encima de los + 10°C al menos por 3 días	X				

Fuente: Referencia 5

18.5. MÉTODO GRÁFICO PARA CALCULAR LA CANTIDAD DE AGUA EVAPORADA

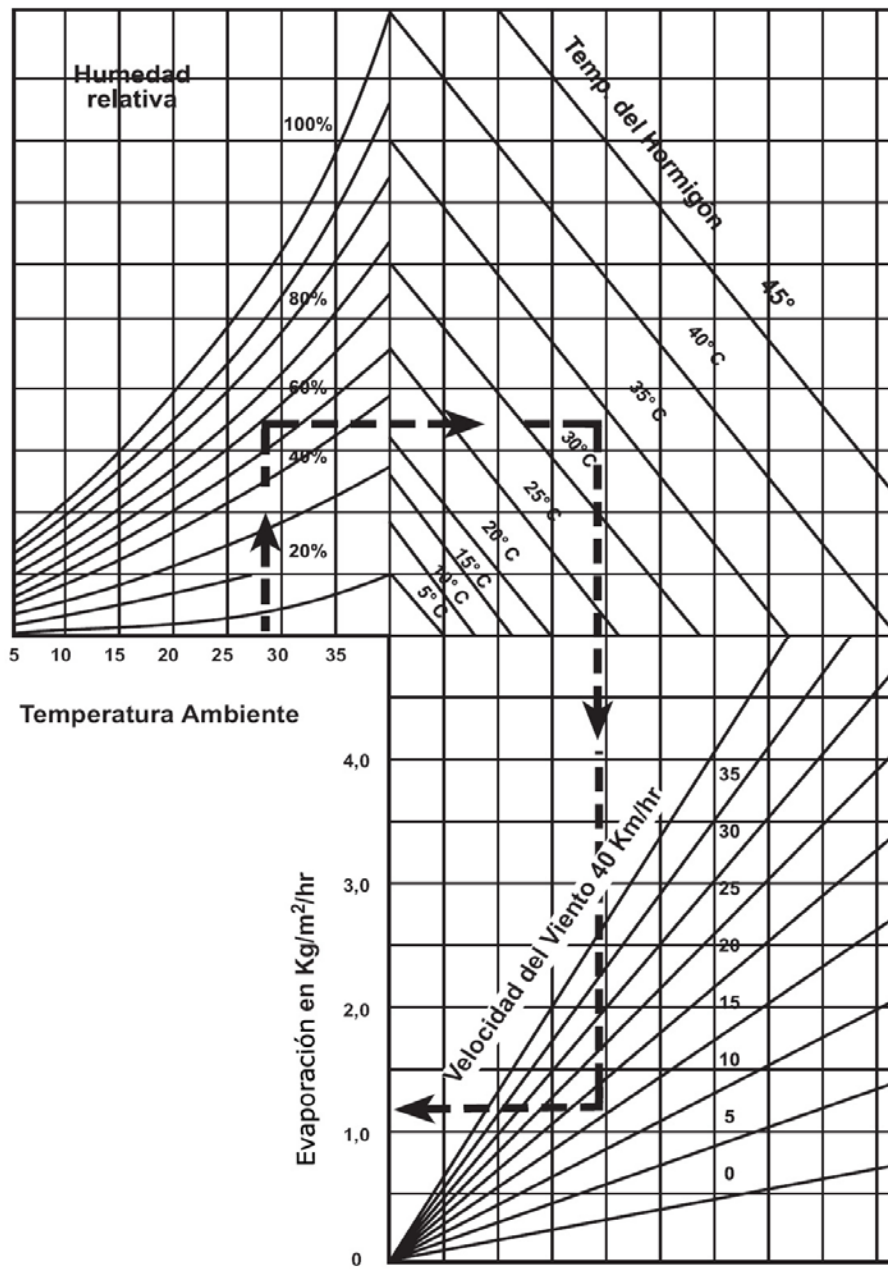
La velocidad de deshidratación depende de los siguientes factores:

- Temperatura del aire.
- Temperatura del hormigón
- Humedad relativa del aire.
- Velocidad del viento.

El ábaco de la figura 18.4 es útil para caracterizar el entorno en el cuál el hormigón se está vaciando. Esto puede ser provechoso para pronosticar la necesidad de medidas el curado y de protección y para estimar los probables efectos de cambios en la temperatura del aire o del hormigón, humedad, o velocidad del viento en la evaporación.

El ábaco se utiliza para estimar el índice de evaporación con el fin de evaluar el riesgo de agrietamiento plástico. Esto se basa en la suposición de que la superficie comienza a secarse cuando el *Índice de Evaporación* excede al *Índice de Exudación*.

El índice de exudación se asume normalmente igual a 1,0 kg/m²/h para hormigones fabricados con Cemento Pórtland y de 0.5 kg/m²/h para hormigones fabricados con Cemento Pórtland con Puzolana. Como consecuencia una evaporación superior a estos valores, dependiendo el caso, produce casi inevitablemente el agrietamiento plástico.



Observando el grafico podemos ver que con una temperatura ambiente de 29°C , una humedad relativa de 60% , una temperatura del hormigón de 34°C y 17 km/hr de velocidad del viento, se tiene una evaporación de $1,2 \text{ kg}$ de agua por m^2/hr .

FIGURA 18.6 Nomograma para la estimación del índice de evaporación de un entorno, asumiendo una superficie cubierta por agua en la cual la temperatura del agua es igual a la temperatura del hormigón. (Menzel 1954; NRMCA 1960).

Fuente: Referencia 2

Se debe medir cada uno de estos datos en las siguientes condiciones:

1. Velocidad del viento: a 50 cm de la superficie de evaporación.
2. Humedad relativa y temperatura del aire: entre $1,2$ y $1,8 \text{ m}$ de la superficie, contra el viento.
3. La superficie no debe estar expuesta a la acción de los rayos solares.

Se puede calcular la temperatura del Hormigón, mediante el método ASTM C1064, o mediante las ecuaciones aproximadas que dan la ACI 305R en su apéndice A y que se dan a continuación:

Sin hielo [unidades del Sistema Internacional]:

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa}}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_{wa}} \quad (\text{E 18.1})$$

Con hielo [unidades del Sistema Internacional]:

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa} + 79.6 W_i}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}} \quad (\text{E 18.2})$$

Donde:

- Ta = temperatura del agregado
- Tc = temperatura del cemento
- Tw = temperatura del agua de mezclado de una fuente corriente (sin hielo)
- Ti = temperatura del hielo. (Nota: Se asume que la temperatura del agua libre y absorbida por el agregado es la misma que la del agregado. Todas las temperaturas están en °C)
- Wa = Peso seco del Agregado
- Wc = Peso del cemento
- Wi = peso del hielo
- Ww = Peso del agua de mezclado
- Wwa = Peso del agua libre y absorbida por el agregado.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI 308-01 Guide to Curing Concrete.
2. ACI 305 -99 Hot Weather Concreting.
3. WADDELL J. J. y DOBROWOLSKI J. A. (1997) "Manual de la Construcción con Concreto". 3ª ed., Tomo I. McGraw_Hill, Mexico.
4. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". 14ª ed., Gustavo Gili, SA, Barcelona.
5. <http://www.construaprende.com>.
6. KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., (2002) Portland Cement Association "Design and Control of Concrete Mixtures". 14ª ed., www.portcement.org
7. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

CAPITULO 19

HORMIGONADO EN TIEMPO FRÍO Y CALIENTE

19.1. INTRODUCCIÓN

La temperatura del hormigón durante las reacciones químicas de la hidratación tiene un efecto importante sobre la razón de ganancia de resistencia.

Las temperaturas cercanas al punto de congelación del agua retardan el fraguado o endurecimiento del hormigón hasta casi nulo. Si la temperatura cae por debajo de la de congelación, el agua libre que se encuentre en el hormigón se convertirá en cristales de hielo y, puesto que el hielo tiene mucho mayor volumen que la misma agua en estado líquido, el hormigón revienta y, al deshelarse, no tendrá resistencia.

Si la temperatura se encuentra por encima de 32°C, existe un gran peligro de que el agua se evapore con rapidez, pudiendo reemplazarse sólo se con un tiempo de curado mucho mayor para completar la hidratación. Es probable que se tengan grietas en la superficie del hormigón en un día caliente de verano, porque las reacciones de fraguado se llevan a efecto más rápido y el calor interno debido a la hidratación causa expansión mayor en el interior que en la superficie.

Por ello se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones para conseguir un buen hormigón, según el clima en el que se presente la construcción:

19.2. HORMIGONADO EN TIEMPO CALIENTE

19.2.1. GENERALIDADES

Los climas calurosos pueden crear problemas al mezclar, vaciar y curar el hormigón. Estos problemas pueden afectar de manera adversa a las propiedades y la serviciabilidad del hormigón y se relacionan con:

- 1) ***Mayor velocidad de hidratación del cemento***, que depende de la temperatura del hormigón, composición y finura del cemento y los aditivos utilizados.
- 2) ***Mayor velocidad de evaporación en el hormigón recién mezclado.***

Para el vaciado se suele limitar la temperatura para controlar la resistencia, durabilidad, agrietamiento plástico, agrietamiento térmico y encogimiento por secado (ver capítulo “otras propiedades” apartado 10.3).

Por lo general si la resistencia del hormigón es satisfactoria y las practicas de curado son las suficientes para evitar el secado de la superficie, la durabilidad del hormigón en tiempo calido no será diferente del hormigón vaciado en temperaturas normales.

19.2.2. DEFINICIÓN DE TIEMPO CALIDO.

Este será la combinación de cualquiera de las siguientes condiciones que tienden a disminuir la calidad del hormigón recién mezclado o endurecido por la aceleración en la velocidad de perdida de humedad y la de hidratación del cemento, o que causen resultados dañinos, como ser:

- Alta temperatura ambiente
- Radiación Solar
- Baja humedad relativa
- Alta temperatura del hormigón
- Velocidad del viento

Los efectos de las primeras 3 se pueden agravar por el aumento de la velocidad del viento. Una forma de determinar la velocidad de evaporación es mediante la figura 18.4.

19.2.3. PRINCIPALES PROBLEMAS EN TIEMPO CALIDO

19.2.3.1. DEFICIENCIAS DEL HORMIGÓN FRESCO

- Mayor demanda de agua
- Mayor velocidad de la “perdida de revenimiento” y la correspondiente tendencia de añadir agua en obra.
- Incremento en la velocidad de fraguado, que da por resultado una mayor dificultad en el manejo, compactado, y acabado y un mayor riesgo de juntas frías¹.
- Incremento en la tendencia de fisuras por contracción plástica.
- Dificultad de controlar el contenido de aire incluido.

19.2.3.2. DEFICIENCIAS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

- Menor resistencia los 28 días y resistencias tardías, resultado de la mayor demanda de agua, mayor temperatura del hormigón o ambas al momento de la colocación o durante los primeros días.

¹ Ver glosario

- Menor durabilidad resultado del agrietamiento
- Mayor probabilidad de corrosión del acero
- Mayor permeabilidad como resultado del alto contenido de agua, curado inadecuado, carbonatación.

La figura 19.1 muestra que al incrementar las temperaturas de curado, al 1^{er} día la resistencia se incrementa y a los 28 días la resistencia disminuye.

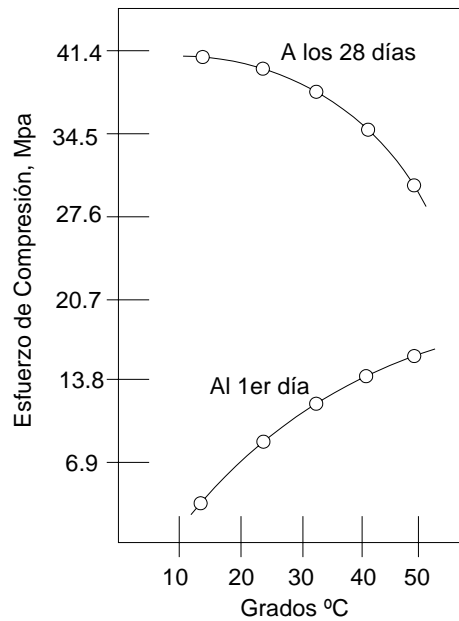


FIGURA 19.1. Efecto de la temperatura de curado, en el esfuerzo de compresión del Hormigón

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 2

19.2.4. MEDIDAS A TOMAR

Las siguientes medidas se deben seguir para evitar problemas en el hormigonado en tiempos calidos. Cada una de estas se discuten con detalle en la ACI 305:

- Seleccionar los materiales para el hormigón y dosificar según experiencias anteriores satisfactorias, en climas calidos.
- Enfriar el hormigón;
- Usar un hormigón con una consistencia que permita una colocación rápida y una compactación efectiva
- Minimizar el tiempo de transporte, colocado, compactación y acabado del hormigón.

- Elaborar el plan de trabajo para evitar exposición adversa del hormigón al ambiente, programando las operaciones de colocado durante horas del día o de la noche cuando las condiciones son favorables.
- Proteger el hormigón de pérdida de humedad durante los periodos de colocación y curado, mediante laminas de plástico, esteras de paja, capas de arena, o alguna de las mencionadas en el capítulo de curado.
- Preparar una reunión antes de la colocación para discutir los requerimientos del hormigonado en tiempo calido.

Las precauciones deben ser mas estrictas en días soleados y ventosos que en días húmedos y calmos, incluso con las mismas temperaturas.

De acuerdo a la NB 604 cuando las condiciones ambientales induzcan una evaporación igual o mayor que 1kg de agua por m² por hora (fig 18.4), la temperatura del hormigón, en el momento de ser colocado, debe ser menor que 30°C en elementos corrientes y menor que 16°C en elementos cuya dimensión exceda de 0.80m.

19.3. HORMIGONADO EN TIEMPO FRÍO

19.3.1. DEFINICIÓN DE TIEMPO FRÍO

Es el periodo en el cual se dan las condiciones descritas a continuación por más de tres días consecutivos:

1. La temperatura promedio diaria* es menor que 5°C.
2. La temperatura ambiente no es mayor a 10°C por más de 12hrs.

*La temperatura promedio diaria es el promedio de la mayor y la menor temperatura en un periodo entre las 0 y 24hrs de un solo día.

Nota.- los valores dados en este capítulo (tiempos y temperaturas) no son exactos para todas las situaciones y no deben ser utilizados como tales. Se debe usar discreción al decidir lo que es adecuado en cada circunstancia en particular.

19.3.2. MEDIDAS DE PRECAUCIÓN

19.3.2.1. TEMPERATURA DE COLOCACIÓN

La temperatura de colocación no debe ser mayor que las temperaturas mínimas dadas en la tabla 19.1, por más de 11°C.

El hormigón colocado en tiempo frío, protegido contra la congelación y que ha recibido un largo tiempo de curado desarrolla una resistencia final mayor y gran durabilidad. Es por esto menos propenso a fisurarse que un hormigón idéntico colocado a mayores temperaturas.

TABLA 19.1 TEMPERATURAS RECOMENDADAS PARA EL HORMIGÓN

	Temperatura ambiente	Dimensión mínima del elemento, mm			
		<300 mm	300-900 mm	900-1800 mm	>1800 mm
Temperatura mínima de vaciado y periodo protección	-	13 C	10 C	7 C	5 C
Temperatura mínima de mezclado, según la temperatura ambiente*	> - 1 C	16 C	13 C	10 C	7 C
	-18 a -1 C	18 C	16 C	13 C	10 C
	< - 18 C	21 C	18 C	16 C	13 C
Máximo cambio gradual de temperatura en las primeras 24hrs después del final de la protección	-	28 C	22 C	17 C	11 C

* Para climas más fríos, se debe dar un margen mayor entre la temperatura de mezclado y la mínima requerida para hormigón fresco en sitio.

Fuente: Referencia 3

19.3.2.2. TEMPERATURA DE MEZCLADO

La temperatura de mezclado no debe ser mayor que las temperaturas mínimas dadas en la tabla 19.1, por más de 8°C.

Para conseguir la temperatura requerida en la mezcla de hormigón, se calientan los materiales. Si bien es difícil calentar los agregados uniformemente a cierta temperatura, la temperatura del agua de mezclado se logra fácilmente mezclando agua fría y caliente.

Calentamiento del agua de mezclado

La temperatura del agua debe ser la misma para todas las mezclas, ya que diferentes temperaturas de agua generarán mezclas de diferentes comportamientos.

Calentamiento de los agregados

Cuando los agregados están libres de hielo, la temperatura deseada del hormigón durante el mezclado se puede lograr calentando solamente el agua. Pero cuando las temperaturas son menores a -4°C, es necesario calentar también los agregados, ya sea mediante vapor o el método que se considere conveniente.

La temperatura de la mezcla final se puede estimar si se conoce la temperatura y peso de los materiales, y el contenido de humedad de los agregados. Este procedimiento se describe en la ACI 306.

19.3.3. PREPARACIÓN PARA EL HORMIGONADO

1. **La Temperatura de las superficies en contacto** con el hormigón fresco debe ser apenas mayor a la temperatura de congelación, es decir 2°C y si es posible no mas de 5°C por encima de la mínima temperatura de vaciado dada en la tabla 19.1
2. **Remover la nieve y el hielo**
3. **El material de subrasante no debe estar congelado** cuando se vacíe hormigón encima.

El encargado de la construcción debe haber planeado con anterioridad que precauciones serán tomadas para proteger el hormigón fresco de la congelación y para mantener la temperatura del hormigón por encima de la recomendada.

El tiempo de protección se puede reducir:

- (1) usando un aditivo acelerador
- (2) añadiendo 60 kg/m³ de cemento más de lo que se calculo

Los valores de la tabla 19.1 se aplican cuando:

1. Le sigue curado y protección suficientes para desarrollar la resistencia requerida.
2. El hormigón no será sujeto a congelación en una condición de saturación crítica.

Otros métodos

Un método mas efectivo pero mas caro es el de cubrir la estructura para protegerla del viento, manteniendo el aire frío afuera y conservar el calor en el interior. Este sistema se utiliza cuando la temperatura ambiente es menor a - 20°C. Pueden ser hechos de cualquier material como lonas, madera o láminas de plástico. Los hechos con material flexible son más baratos y más fáciles de manejar, pero los rígidos bloquean mejor el viento. El calor al interior se proporciona por vapor, aire caliente o calentadores de combustión.

19.3.4. ACELERACIÓN DEL FRAGUADO Y DESARROLLO DE LA RESISTENCIA

Si se toman las precauciones necesarias, se pueden utilizar un aditivo acelerador o mayor cantidad de cemento para acortar el tiempo de fraguado y alcanzar la resistencia requerida. Con estas medidas se conseguirán ahorros debido al menor tiempo de protección necesario, reutilización de los encofrados en menos tiempo, quitar los puntales antes.

En estructuras masivas de hormigón (ej. Presas), no se debe intentar acelerar la ganancia de resistencia, debido a que el aumento en la temperatura interna en este tipo de estructuras es crítico y una aceleración la intensificaría.

TABLA 19.2 TIEMPO DE PROTECCIÓN REQUERIDA PARA PREVENIR DAÑOS POR CONGELACIÓN EN LOS PRIMEROS DÍAS, EN HORMIGÓN CON AIRE INCLUIDO

Tipo de Exposición	Periodo de protección a la temperatura indicada en la tabla 19.1, en días	
	Cemento tipo I	Con aditivo acelerador o con 60kg/m ³ mas de cemento
Expuesta a poca o ninguna congelación o deshielo en servicio o durante la construcción.	2	1
Expuesto al ambiente, en servicio o durante la construcción.	3	2

Fuente: Referencia 3

19.3.5. OBJETIVOS DE LA PROTECCIÓN

El descuido en la protección contra congelación en los primeros días, pueden causar un hormigón débil o destrucción inmediata. Por lo tanto si se realizará hormigonado en tiempo frío es esencial una protección para bajas temperaturas y un curado adecuado. Se aconseja seguir las siguientes recomendaciones:

1. Prevenir daños al hormigón debido a congelación en los primeros días, hasta que la cantidad de agua baje del estado de saturación crítico. Cuando el hormigón esta recién mezclado tiene una gran cantidad de agua, y si este hormigón se expone a congelación, el agua se expandirá causando daño (el agua se expande un 9% en su transformación a hielo). Se considera que se ha pasado el estado de saturación crítica, cuando el hormigón ha alcanzado una resistencia a la compresión de 3.5MPa (35Kg/cm²). (A una temperatura de 10°C, esto ocurre aproximadamente al segundo día.)

TABLA 19.3 TIEMPO DE PROTECCIÓN PARA HORMIGÓN VACIADO DURANTE TIEMPO FRÍO

Categoría de servicio	Periodo de Protección a la temperatura indicada en la primera Línea de la Tabla 19.1, días	
	Cemento Tipo I	Con aditivo acelerador o con 60kg/m ³ mas de cemento
1.- Sin carga, no expuesta	2	1
2.- Sin carga, expuesta	3	2
3.- Parcialmente cargada, expuesta	6	4
4.- Completamente cargada	Capitulo 6 del ACI 306	

Fuente: Referencia 3

2. Asegurarse que el hormigón desarrolle la resistencia requerida para retirar el encofrado y los puntales, y para cargar con seguridad la estructura durante y después de la construcción.
3. Mantener las condiciones de curado que logren un desarrollo normal de la resistencia sin usar demasiado calor y sin causar saturación crítica del hormigón al finalizar el periodo de protección. En caso de haber llegado a causar este estado de saturación, se debe dejar secar un poco el hormigón antes de retirar la protección y exponer el hormigón a temperaturas de congelación.

TABLA 19.4 MÁXIMA CAÍDA DE LA TEMPERATURA DURANTE LAS PRIMERAS 24 HRS. DESPUÉS DEL FINAL DEL PERIODO DE PROTECCIÓN

Dimensión mínima del elemento, mm			
< 300 mm	300 a 900 mm	900 a 1800 mm	> 1800 mm
28 °C	22 °C	17 °C	11 °C

Fuente: Referencia 3

4. Limitar los cambios bruscos de temperatura, particularmente antes de que el hormigón haya desarrollado una resistencia suficiente para soportar los esfuerzos térmicos. Al final del periodo de protección, los medios de protección deben ser retirados poco a poco, para que la temperatura de la superficie descienda gradualmente en las siguientes 24hrs.
5. Proporcionar protección de acuerdo a la utilidad que se intenta dar a la estructura. La intención es que las estructuras tengan una vida útil de muchos años. La obtención de resultados satisfactorios de cilindros es irrelevante si la estructura tiene esquinas dañadas por congelación, zonas deshidratadas, curado inadecuado y trabajo descuidado.

TABLA 19.5 DURACIÓN DEL TIEMPO DE PROTECCIÓN PARA UN PORCENTAJE DE LA RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS

Porcentaje de la resistencia a los 28 días	a 10°C, en días	a 21°C, en días
	cemento tipo I	cemento tipo I
50	6	4
65	11	8
85	21	16
95	29	23

* La información en esta tabla se consiguió de hormigones con resistencias entre 20.7 a 34.4 Mpa después de 28 días de curado a 21±1.7°C. La resistencia a los 28 días se considero como el 100%. Estos tiempos de protección son solamente aproximados, y valores específicos deben ser obtenidos para el hormigón utilizado en obra

Fuente: Referencia 3

BIBLIOGRAFÍA

1. NB 604:1994 Hormigones – Requisitos.
2. ACI 305R-99 Hot Weather Concreting.
3. ACI 306R-88 (Reapproved 2002) Cold Weather Concreting.
4. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

VI

HORMIGONES ESPECIALES

CAPITULO 20

HORMIGONES ESPECIALES

20.1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de hormigones especiales se origina por la necesidad de satisfacer requisitos muy particulares, como se vera a lo largo de este capitulo. Actualmente su clasificación es sumamente amplia y está relacionada tanto con variantes en los componentes tradicionales y/o uso adicional de materiales distintos a estos, como con innovaciones en los equipos de producción, colocación y compactación que motivan a efectuar diseños de mezclas con características que difieren bastante del hormigón de uso corriente.

En este Capítulo no pretendemos tratar con gran detalle toda la variedad de hormigones especiales, pues muchos de estos hormigones nunca se han hecho en el país y posiblemente tome mucho tiempo el introducirlos, por lo que hemos preferido dar una visión general de los principales, con el propósito de promover el interés por la investigación de cada una de estos e ir ingresando en la Tecnología de Hormigón moderna y en los nuevos procedimientos constructivos, que a largo plazo significan economía y resultados mas eficientes.

Cada uno de los hormigones especiales que se presentan en este capitulo tienen referencia al reporte del comité de la ACI, y los ensayos de la ASTM que los tratan, siendo importante tener presente que los principios y la técnica para ejecutar diseños de mezcla para estos hormigones y aplicarlos en obra son accesible para cualquiera, si profundiza en la bibliografía técnica disponible.

Sólo como ilustración y para tener una visión general de las amplias posibilidades de la tecnología del hormigón actual en cuanto a hormigones especiales, haremos una enumeración y descripción breve de algunos de ellos:

20.2. HORMIGÓN MASIVO (EN MASA) (ACI 207.1R - 207.4R)

Utilizado en estructuras de grandes dimensiones, como en presas, donde el problema del calor de hidratación se torna crítico por los volúmenes involucrados. Dado que el calor no se disipa rápidamente, la temperatura puede llegar a ser muy alta, pudiéndose crear esfuerzos de tracción significativos debido a los cambios de volumen asociados con el aumento y la disminución de la temperatura dentro la masa.

El diseño de estructuras de hormigón masivo se basa en seleccionar la combinación de los materiales que satisfagan los requerimientos de la estructura respecto a durabilidad, economía, trabajabilidad, estabilidad volumétrica, libertad para agrietarse, aumento de temperatura bajo, resistencia adecuada y, en el caso de estructuras hidráulicas, baja permeabilidad.

20.3. HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO. (ACI 207.5R, 325.10R)

Es un tipo de hormigón masivo con consistencia de revenimiento cero. Este es transportado, colocado y compactado usando la maquinaria para movimiento de tierras y compactación de suelos.

Es probablemente el logro más importante en la tecnología para presas de hormigón en el último cuarto siglo. El uso de este ha permitido que muchas presas nuevas sean económicamente factibles debido al reducido costo derivado del rápido método de construcción. Además, recientemente se ha incursionado en el uso de este hormigón en la construcción de pavimentos.

El hormigón compactado con rodillo provee economía y gran rapidez constructiva, siendo una técnica que se está difundiendo cada vez más a nivel mundial por sus múltiples ventajas, en Bolivia se ha tenido una experiencia con el uso de este hormigón en la presa de Comarapa. Como referencia del uso del hormigón compactado con rodillo en pavimentos, se puede nombrar la tesis realizada por Juan Carlos Rocha estudiante en la UMSS de la carrera de Ingeniería Civil.

20.4. HORMIGÓN LIGERO. (ACI 211.2; 213R; 304.5R)(ASTM C630-C632)

Es empleado sobre todo en la industria de los elementos prefabricados o donde se requiera disminuir cargas muertas. Se emplean agregados de densidad inferior a la usual, obteniéndose pesos en el Hormigón del orden de 1500 a 1800 Kg/m³.

Tiene muchas y variadas aplicaciones: pórticos y losas en edificios de muchos pisos, puentes, elementos pretensados o prefabricados de todos los tipos, y otros.

El hormigón con agregado ligero estructural es un hormigón estructural en todo sentido.

20.5. HORMIGONES EXPANSIVOS O ANTI-CONTRACCION. (ACI 223)

En este tipo de hormigón se producen incrementos de volumen luego del endurecimiento que contrarrestan las contracciones. Este se puede producir usando cementos expansivos o componentes expansivos cuya función es contrarrestar o minimizar las deformaciones causadas por la contracción por secado.

El hormigón expansivo (compensador de la contracción) se utiliza extensivamente en varios tipos de construcción para reducir al mínimo el agrietamiento causado por la contracción por secado, como por ejemplo en losas, pavimentos y otras estructuras.

20.6. HORMIGÓN FIBRO-REFORZADO (ACI 544.1R - 544.4R; ACI 440R)

Hormigón convencional al que se le añaden fibras de diversos materiales como ser acero (ver apartado 5.2.4), vidrio, sintéticos como nylon y plástico, etc., en forma distribuida, con objeto de crear una estructura interior que pueda resistir más tracción que en un hormigón normal. Adquiere características sumamente importantes en cuanto a la resistencia a la abrasión y al impacto, favoreciendo además la ductilidad de las estructuras, incluso dando la posibilidad de reducir el acero de refuerzo.

Las características más significativas del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA) son la mejorada resistencia a la flexión (así como la habilidad para absorber energía después de agrietarse), resistencia al impacto y resistencia flexión por fatiga. Por esta razón, HRFA ha encontrado muchos usos en losas planas sobre el suelo las cuales están sujetas a cargas grandes e impacto. HRFA también se ha utilizado para numerosas aplicaciones de hormigón lanzado (shotcrete) como ser soporte de suelo, estabilización de taludes en roca, construcción de túneles y reparaciones (mas detalles en el apartado 5.2.4).

El Hormigón Reforzado con Fibra de Vidrio (HRFV) se ha utilizado extensivamente en paneles de revestimiento arquitectónicos, debido a su peso ligero, economía y la capacidad de ser moldeado. También se ha utilizado en productos fabricados en planta.

Hormigón Reforzado con Fibras Sintéticas (HRFS) ha encontrado sus aplicaciones comerciales más grandes en losas sobre el suelo, losas de piso y elementos vaciados en sitio en edificios multipisos. La investigación reciente en fibras y compuestos ha abierto nuevas posibilidades al uso de fibras sintéticas en elementos de construcción. Elementos delgados fabricados con HRFS pueden demostrar alta ductilidad mientras que conservan su integridad. Actualmente, en nuestro medio, COBOCE Hormigón esta empleando fibras sintéticas, como las que se muestran en la figura 20.1, para la fabricación de pavimento rígido.

20.7. HORMIGÓN REFRACTARIO

Elaborado con cementos especiales de alto contenido de aluminatos de calcio, que dosificados con agregados de muy buenas características térmicas permiten soportar temperaturas hasta de 1900°C. No se diseñan para tener comportamiento estructural, sino, por sus características de resistencia al calor, en la construcción de estructuras que van a estar sometidas a altas temperaturas, como es el caso de muchas instalaciones industriales.



FIGURA 20.1. Fibras Sintéticas

Laboratorio Coboce Hormigón - Cochabamba
Fuente: Propia

20.8. HORMIGÓN SULFUROSO. (ACI 548.2R)

Preparado empleando cementos de los denominados sulfurosos y agregados normales, en una mezcla en caliente que al enfriar adquiere sus características resistentes muy rápidamente, alcanzando una resistencia a la compresión mayor a 630 kg/cm^2 después de un día de vaciado. Por lo general, se triplican las propiedades resistentes y el tiempo de vida útil de las estructuras.

Se utilizan actualmente sobre todo en las áreas donde los materiales convencionales como el hormigón de cemento Pórtland, falla, ya que es impermeable y extremadamente resistente al ataque de ácidos minerales y sales, aunque generalmente no son resistentes a los álcalis o a los oxidantes.

20.9. HORMIGÓN CON MICROSILICE (ACI 234R)

Las fundiciones de metales silíceos y ferrosilíceos producen gases y vapores, que contienen micropartículas de sílice, que son recolectadas por los sistemas que evitan la contaminación ambiental en la industria siderúrgica. Estos residuos contienen óxido de sílice (SiO_2) en grandes cantidades, que reaccionan con el cemento Pórtland mejorando las características del gel y consecuentemente las del hormigón.

Utilizando el microsilice, como parte del material cementante, las resistencias en compresión puede llegar a 1500 Kg/cm^2 , la resistencia a las alternancias de temperatura es notable, así también como ante la agresividad química y el deterioro ante la reacción alcalina de los agregados.

Como referencia al diseño de este tipo de hormigón, se puede nombrar la tesis realizada por Fidel Candiotti Garzon, "Diseño de Mezclas de Hormigón Armado de Alta Resistencia Empleando Microsilice", estudiante en la UMSS en la carrera de Ingeniería Civil.

20.10. HORMIGÓN CON AGREGADO PRECOLOCADO (HORMIGÓN INYECTADO)

(ACI 304.1R)(ASTM C953; C937-C943)

Es un hormigón en el cual el agregado se coloca primero en el encofrado, y luego se inyecta una lechada de cemento o un mortero de cemento con aditivos fluidificantes que rellenan los espacios entre las partículas.

Su estructura resultante depende mucho del agregado pues las partículas están en contacto y no separadas por la matriz de pasta, confiriendo al hormigón propiedades como ser mayor módulo de elasticidad, menor contracción por secado y mayores resistencias en compresión.

Este es particularmente útil para la construcción bajo el agua, vaciado en áreas muy congestionadas por el refuerzo, en reparaciones de hormigón y en mampostería donde el reemplazo participara en la distribución de esfuerzos, en hormigón pesado (de alta densidad), y en el general, donde se requiera hormigón que de poco cambio de volumen.

20.11. HORMIGÓN LANZADO (SHOTCRETE) (ACI 506R - 506.4R)

El principio del Shotcrete consiste en lanzar o disparar neumáticamente por un tubo una mezcla de hormigón a la que se añade un aditivo acelerante que produce un endurecimiento muy veloz, mientras esta mezcla va impactando sobre la superficie a recubrir, inicialmente rebota el material grueso y sólo se adhiere a la superficie el mortero, creando una capa de base sobre la que posteriormente se incrustan las partículas gruesas, creando la estructura convencional del hormigón.

Se utiliza mayormente al trabajo en túneles donde se necesita un revestimiento de protección, resistente, con mucha rapidez de fraguado durante la perforación y posteriormente queda como recubrimiento permanente.

El endurecimiento al momento del lanzado debe producirse en un tiempo muy rápido pues de otro modo la mezcla se desprende de la superficie de aplicación en la medida que aumenta el espesor colocado.

20.12. HORMIGÓN PESADO. (ACI 211.1)(ASTM C637, C638)

En la elaboración de estos hormigones se utilizan agregados de pesos específicos entre 3.4 y 7.5, combinados entre ellos o con agregados normales. Los hormigones pesados tienen pesos unitarios que oscilan usualmente en el rango de 2700 a 5000 Kg/m³.

Se utiliza para crear una barrera protectora contra la radiación nuclear pero en algunos casos se les usa sólo como contrapeso. Para que el hormigón normal sea efectivo en la atenuación del flujo radioactivo se necesitan espesores sumamente grandes, es debido a esto que se desarrollaron los hormigones pesados, en que por su mayor densidad, producen la atenuación del flujo radioactivo con espesores mucho menores.

En la Tabla 20.1 se pueden apreciar algunos de estos agregados típicos, utilizados en la fabricación de estos hormigones:

TABLA 20.1 AGREGADOS PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PESADO

Denominación	Peso Específico	Peso Unitario del Hormigón Pesado (Kg/m ³)
Limonita, Geotita	3.4 a 3.8	2900 a 3100
Barita	4.0 a 4.4	3300 a 3600
Ilmenita, Hematita, Magnetita	4.2 a 5.0	3450 a 3850
Acero/Hierro	6.5 a 7.5	5000 a 5600

Fuente: Elaboración Propia en base a la Referencia 10

20.13. FERROCEMENTO

El ferrocemento es una forma de hormigón armado, una construcción de hormigón de poco espesor, flexible, en la que el número de mallas de alambre de acero de pequeño diámetro están distribuidas uniformemente a través de la sección transversal, este refuerzo ofrece un soporte al mortero durante su aplicación y evita la formación de grietas de contracción y de tensión. Se utiliza un mortero de arena gruesa, con alta proporción de cemento Portland y poca agua.

Características Técnicas. La resistencia excepcional del ferrocemento se debe a que su armadura está compuesta por varias capas de mallas de acero de poco espesor superpuestas y ligeramente desplazadas entre sí, ya que el concreto soporta considerable deformación en la inmediata proximidad del refuerzo, condición que se aprovecha al máximo con la distribución de las armaduras descritas.

Su comportamiento mecánico, dependiente principalmente de la superficie específica de la armadura, es muy bueno. Presenta una buena resistencia a la tracción, que supera sensiblemente a la mostrada por el hormigón armado, y se mantiene en el rango elástico hasta su fisuración. La presencia de las capas de mallas metálicas, no modifican la resistencia a la compresión, por lo que la misma específicamente queda definida por la resistencia a compresión del mortero que forma la matriz.

Ventajas:

- Método de construcción simple
- Ahorro en materiales, en especial cemento.
- Materiales y herramientas fáciles de encontrar.
- Muy buena resistencia a la corrosión (mas de 50 años de vida util, segun Watt, 1978).
- Muy buena impermeabilidad, no necesita impermeabilizantes.
- Estructura liviana, que evita problemas de estabilidad de fundaciones.
- Fácil mantenimiento y reparación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI 207.1R-96 Mass Concrete.
2. ACI 207.5R-99 Roller Compacted Mass Concrete.
3. ACI 213R-87 Guide for Struclural Lightweight Aggregate Concrete.
4. ACI 223-98 Standard Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete.
5. ACI 544.1R-96 Stale-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete.
6. ACI 548.2R-93 Guide for Mixing and Placing Sulfur Concrete in Construction.
7. ACI 234R-96 Guide for the Use of Silica Fume in Concrete.
8. ACI 304.1R-92 Guide for the Use of Preplaced Aggregate Concrete for Structural and Mass Concrete Applications.
9. ACI 506R-90 Guide to Shotcrete.
10. ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
11. ACI 325.10R-95 Report on Roller-Compacted Concrete Pavements.
12. www.sitioferrocemento.com
13. http://www.concrete.org/committees/com_dir.htm (página ACI)

VII

**CONTROL DE
CALIDAD**

CAPITULO 21

CONTROL DE CALIDAD

BASES GENERALES DEL CONTROL DE LA CALIDAD

21.1. CONTROL DE CALIDAD

Este capítulo trata del control de recepción de la calidad del hormigón y de sus materiales componentes, del acero y de la ejecución de la obra.

El fin del control es comprobar que la obra terminada tiene las características de calidad especificadas en el proyecto, tanto las de norma como las contenidas en el Pliego de Especificaciones Técnicas.

La eficacia final del control de calidad es el resultado de la acción complementaria del control ejercido por el productor (control interno) y del control ejercido por el receptor (control externo).

Este capítulo ha sido sintetizado de la sección 5 de la CBH 87 y del Título VI del EHE-99.

21.2. CONTROL DE MATERIALES

21.2.1. CONTROL DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN

En el caso de hormigones fabricados en central, dicho control debe estar en todo momento claramente documentado y la correspondiente documentación estará a disposición de la Dirección de Obra y de los Laboratorios que eventualmente ejerzan el control externo del hormigón fabricado.

El control de los componentes del hormigón se realizará de la siguiente manera:

- a) Si la central dispone de un Control de Producción y está en posesión de un Sello o Marca de Calidad, oficialmente reconocido, no es necesario el control de recepción en obra de los materiales componentes del hormigón.

En otros casos, se estará a lo dispuesto en los apartados siguientes de este capítulo.

21.2.1.1. CEMENTO

En cualquier caso el responsable de la recepción del cemento en la central de hormigonado u obra, deberá conservar durante un mínimo de 100 días una muestra de cemento de cada lote suministrado.

Especificaciones.- Deben cumplir con lo expresado en el punto 2.1 del CBH-87 y con el Pliego de

Especificaciones Técnicas. No podrán utilizarse lotes de cemento que no lleguen acompañadas del certificado de garantía del fabricante.

Ensayos.- Antes de comenzar el hormigonado, o si varían las condiciones de suministro, y cuando lo indique la Dirección de Obra se realizarán los ensayos físicos, mecánicos y químicos previstos en la Norma boliviana referente al cemento Portland (Cap 1 de este texto), además de los previstos, en su caso, en el Pliego de Especificaciones Técnicas.

Al menos una vez cada tres meses de obra, y cuando lo indique la Dirección de Obra, se comprobarán: componentes del cemento, principio y fin de fraguado, resistencia a compresión y estabilidad de volumen, según las normas de ensayo establecidas.

Criterios de aceptación o rechazo.- El incumplimiento de alguna de las especificaciones, salvo demostración de que no supone riesgo apreciable tanto desde el punto de vista de las resistencias mecánicas como del de la durabilidad, será condición suficiente para el rechazo de la partida de cemento.

21.2.1.2. AGUA DE AMASADO

Especificaciones.- Son las del punto 2.3 del CBH-87 más las contenidas, en su caso, en el Pliego de Especificaciones Técnicas.

Ensayos.- Cuando no se posean antecedentes de su utilización en obras de hormigón, o en caso de duda, se realizarán los ensayos citados en el punto 2.3 del CBH-87 (cap 3 de este texto).

Criterios de aceptación o rechazo.- El incumplimiento de las especificaciones será razón suficiente para considerar el agua como no apta para amasar hormigón, salvo justificación técnica documentada de que no perjudica apreciablemente las propiedades exigibles al mismo, ni a corto ni a largo plazo.

21.2.1.3. ÁRIDOS

Especificaciones.- Son las del punto 2.2 del CBH-87 más las contenidas, en su caso, en el Pliego de Especificaciones Técnicas.

Ensayos.- Antes de comenzar la obra, siempre que varíen las condiciones de suministro, y si no se dispone de un certificado de idoneidad de los áridos que vayan a utilizarse emitido como máximo un año antes de la fecha de empleo por un laboratorio oficial u oficialmente acreditado, se realizarán los ensayos de identificación mencionados en punto 2.2 del CBH-87 (cap 2 de este texto).

Criterios de aceptación o rechazo.- El incumplimiento de las especificaciones, es condición suficiente para calificar el árido como no apto para fabricar hormigón, salvo justificación especial de que no perjudica apreciablemente las propiedades exigibles al mismo, ni a corto ni a largo plazo.

21.2.1.4. OTROS COMPONENTES DEL HORMIGÓN

Especificaciones.- Son las del punto 2.2 del CBH-87 (cap. 4 de este texto), más las que pueda contener el Pliego de Especificaciones Técnicas.

No podrán utilizarse aditivos que no se suministren correctamente etiquetados y acompañados de la garantía del fabricante, firmado por una persona física.

En el caso de hormigón armado o en masa, cuando se utilicen cenizas volantes o humo de sílice, se exigirá el correspondiente certificado de garantía emitido por un laboratorio oficial u oficialmente acreditado con los resultados de los ensayos prescritos (cap. 4 de este texto).

Ensayos.- Antes de comenzar la obra se comprobará en todos los casos el efecto de los aditivos sobre las características de calidad del hormigón. Tal comprobación se realizará mediante los ensayos previos del hormigón citados en el 16.5.2 del CBH-87 (cap. 4 de este texto). Igualmente se comprobará, mediante los oportunos ensayos realizados en un laboratorio oficial u oficialmente acreditado, la ausencia en la composición del aditivo de compuestos químicos que puedan favorecer la corrosión de las armaduras y se determinará el pH y residuo seco. Como consecuencia de lo anterior, se seleccionarán las marcas y tipos de aditivos admisibles en la obra. La constancia de las características de composición y calidad serán garantizadas por el fabricante correspondiente.

Al menos una vez cada tres meses de obra se realizarán las siguientes comprobaciones sobre las adiciones: trióxido de azufre, pérdida por calcinación y finura para las cenizas volantes, y pérdida por calcinación y contenido de cloruros para el humo de sílice, con el fin de comprobar la homogeneidad del suministro.

Criterios de aceptación o rechazo.- El incumplimiento de alguna de las especificaciones será condición suficiente para calificar el aditivo o la adición como no apto para agregar a hormigones.

21.3. CONTROL DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN

El control de la calidad del hormigón comprenderá normalmente el de su resistencia, consistencia y durabilidad, con independencia de la comprobación del tamaño máximo del árido, o de otras características especificadas en el Pliego de Especificaciones Técnicas.

El control de calidad de las características del hormigón se realizará de acuerdo con lo indicado en los puntos 12.2 y 12.3.1.1 de este texto. La toma de muestras del hormigón se realizará según 12.2.1 de este texto.

Además, en el caso de hormigón fabricado en central, se comprobará que cada amasada de hormigón esté acompañada por una hoja de suministro debidamente cumplimentada y firmada por una persona física.

Las hojas de suministro, sin las cuales no está permitida la utilización del hormigón en obra, deben ser archivadas por el Constructor y permanecer a disposición de la Dirección de la Obra hasta la entrega de la documentación final de control.

Control de la consistencia del hormigón.- Se determinará el valor de la consistencia, mediante el cono de Abrams

- Siempre que se fabriquen probetas para controlar la resistencia.
- En los casos previstos en 21.6.1 de este capítulo (control reducido).
- Cuando lo ordene la Dirección de Obra.

Control de la resistencia del hormigón.- Son los indicados en el punto 21.6.

21.4. ENSAYOS PREVIOS DEL HORMIGÓN

Se realizarán en laboratorio antes de comenzar el hormigonado de la obra para establecer la dosificación que habrá de emplearse, teniendo en cuenta los materiales disponibles y aditivos que se vayan a emplear y las condiciones de ejecución previstas.

Para llevarlos a cabo, se fabricarán al menos cuatro series de probetas procedentes de amasadas distintas, de dos probetas cada una para ensayo a los 28 días de edad, por cada dosificación que se desee establecer. De los valores así obtenidos se deducirá el valor de la resistencia media en el laboratorio f_{cm} que deberá superar el valor exigido a la resistencia de proyecto con margen suficiente para que sea razonable esperar que, con la dispersión que introduce la ejecución en obra, la resistencia característica real de la obra sobrepase también a la de proyecto.

21.5. ENSAYOS CARACTERÍSTICOS DEL HORMIGÓN

Salvo en el caso de emplear hormigón procedente de central o de que se posea experiencia previa con los mismos materiales y medios de ejecución, estos ensayos son preceptivos en todos los casos y tienen por objeto comprobar, en general antes del comienzo del hormigonado, que la resistencia

característica real del hormigón que se va a colocar en la obra no es inferior a la de proyecto.

Los ensayos se llevarán a cabo sobre probetas procedentes de seis amasadas diferentes de hormigón, para cada tipo que vaya a emplearse, enmoldando dos probetas por amasada, las cuales se ejecutarán, conservarán y romperán según los métodos de ensayo a los 28 días de edad.

Con los resultados de las roturas se calculará el valor medio correspondiente a cada amasada, obteniéndose la serie de seis resultados medios: $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_6$

El ensayo característico se considerará favorable si se verifica: $x_1 + x_2 - x_3 \geq f_{ck}$

En cuyo caso se aceptará la dosificación y proceso de ejecución correspondientes. En caso contrario no se aceptarán, introduciéndose las oportunas correcciones y retrasándose el comienzo del hormigonado hasta que, se llegue al establecimiento de una dosificación y un proceso de fabricación aceptable.

21.6. ENSAYOS DE CONTROL DEL HORMIGÓN

Estos ensayos son preceptivos en todos los casos y tienen por objeto comprobar, a lo largo de la ejecución, que la resistencia característica del hormigón de la obra es igual o superior a la de proyecto.

El control podrá realizarse según las siguientes modalidades.

Modalidad 1- Control a nivel reducido

Modalidad 2- Control al 100 por 100, cuando se conozca la resistencia de todas las amasadas.

Modalidad 3- Control estadístico del hormigón, cuando sólo se conozca la resistencia de una fracción de las amasadas que se colocan.

21.6.1. CONTROL A NIVEL REDUCIDO

En este nivel el control se realiza por medición de la consistencia del Hº, fabricado de acuerdo con dosificaciones tipo. Con la frecuencia que se indique en el Pliego de Especificaciones Técnicas o por la Dirección de Obra, y con no menos de 4 determinaciones espaciadas a lo largo del día, se realizará un ensayo de medida de la consistencia, quedando la correspondiente constancia escrita, a través de los valores obtenidos y decisiones adoptadas en cada caso.

Este nivel de control sólo puede utilizarse para obras de ingeniería de pequeña importancia, en edificios de viviendas de una o dos plantas con luces inferiores a 6m o en elementos que trabajen a

flexión de edificios de viviendas de hasta cuatro plantas, también con luces inferiores a 6m. Además, deberá adoptarse un valor de la resistencia de cálculo a compresión f_{cd} no superior a 10 MPa.

No se permite la aplicación de este tipo de control para los hormigones sometidos a clases de exposición III y IV, según la tabla 11.12.

21.6.2. CONTROL AL 100 POR 100

Esta modalidad de control es de aplicación a cualquier obra. El control se realiza determinando la resistencia de todas las amasadas componentes de la parte de obra sometida a control y calculando, a partir de sus resultados, el valor de la resistencia característica real.

Para el conjunto de amasadas sometidas a control se verifica que $f_{c,real} = f_{est}$.

21.6.3. CONTROL ESTADÍSTICO DEL HORMIGÓN

Esta modalidad de control es la de aplicación general a obras de hormigón en masa, hormigón armado y hormigón pretensado.

A efectos de control, salvo excepción justificada, se dividirá la obra en partes sucesivas denominadas lotes, inferiores cada una al menor de los límites señalados en la tabla 21.1. No se mezclarán en un mismo lote elementos de tipología estructural distinta (es decir, que pertenezcan a columnas distintas de la tabla). Todas las amasadas de un mismo lote procederán del mismo Suministrador, estarán elaboradas con las mismas materias primas y serán el resultado de la misma dosificación nominal.

En el caso de hormigones fabricados en central de hormigón en posesión de un Sello o Marca de Calidad, se podrán aumentar los límites de la tabla 21.1 al doble, siempre y cuando se den además las siguientes condiciones:

- Los resultados de control de producción están a disposición del Peticionario y deberán ser satisfactorios. La Dirección de Obra revisará dicho punto y lo recogerá en la documentación final de obra.
- El número mínimo de lotes que deberá muestrearse en obra será de tres, correspondiendo, si es posible, a lotes relativos a los tres tipos de elementos estructurales que figuran en la tabla 21.1.
- En el caso de que en algún lote la f_{est} fuera menor que la resistencia característica de proyecto, se pasará a realizar el control normal sin reducción de intensidad, hasta que en cuatro lotes consecutivos se obtengan resultados satisfactorios.

TABLA 21.1 LÍMITES MÁXIMOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LOS LOTES DE CONTROL

Límite superior	TIPO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES		
	Estructuras que tienen elementos comprimidos (pilares, pilas, muros portantes, pilotes, etc.)	Estructuras que tienen únicamente elementos sometidos a flexión (forjados de hormigón con pilares metálicos, tableros, muros de contención, etc.)	Macizos (zapatas, estribos de puente, bloques, etc.)
Volumen de hormigón	100 m ³	100 m ³	100 m ³
Número de amasadas (1)	50	50	100
Tiempo de hormigonado	2 semanas	2 semanas	1 semana
Superficie Construida	500 m ²	1.000 m ²	---
Número de plantas	2	2	---

(1) Este límite no es obligatorio en obras de edificación

fuente: referencia 1

El control se realizará determinando la resistencia de N amasadas por lote siendo:

$$\begin{aligned} \text{Si } f_{ck} &\leq 25 \text{ MPa} & N &\geq 2 \\ 25 \text{ MPa} < f_{ck} &\leq 35 \text{ MPa:} & N &\geq 4 \\ f_{ck} &> 35 \text{ MPa:} & N &\geq 6 \end{aligned}$$

Las tomas de muestras se realizarán al azar entre las amasadas de la obra sometida a control. Cuando el lote abarque dos plantas, el hormigón de cada una de ellas deberá dar origen, al menos, a una determinación.

Ordenados los resultados de las determinaciones de resistencia de las N amasadas controladas en la forma:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_m \leq \dots \leq x_N$$

se define como resistencia característica estimada, en este nivel, la que cumple las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \text{Si } N < 6; f_{est} &= K_N \cdot x_1 \\ \text{Si } N &\geq 6; f_{est} = 2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{m-1}}{m-1} - x_m \nless K_N \cdot x_1 \end{aligned}$$

Donde:

- K_N = Coeficiente dado en la tabla 21.2 en función de N y clase de instalación en que se fabrique el hormigón.
- x_1 = Resistencia de la amasada de menor resistencia.
- m = N/2 si N es par.
- m = (N-1)/2 si N es impar.

En la tabla 21.2 se realiza una clasificación de las instalaciones de fabricación del hormigón en función del coeficiente de variación de la producción, el cual se define a partir del valor del recorrido relativo r de los valores de resistencia de las amasadas controladas de cada lote. La forma de operar es la siguiente:

- Al comienzo de la obra se acepta la clasificación (A, B ó C) que proponga el Suministrador, la cual conocerá a través de sus resultados de control de producción.
- Para establecer el valor de K_N del lote se determina el recorrido relativo de las resistencias obtenidas en las N amasadas controladas en él, el cual debe ser inferior al recorrido relativo máximo especificado para esta clase de instalación. Si esto se cumple, se aplica el coeficiente K_N correspondiente.
- Si en algún lote se detecta un valor del recorrido relativo superior al máximo establecido para esta clase de instalación, ésta cambia su clasificación a la que corresponda al valor máximo establecido para r. Por tanto, se utilizará para la estimación el K_N de la nueva columna, tanto para ese lote como para los siguientes. Si en sucesivos lotes tampoco se cumpliera el recorrido relativo de la columna correspondiente a la nueva clasificación de la instalación, se procedería de igual forma, aplicando el coeficiente K_N del nivel correspondiente.
- Para aplicar el K_N correspondiente al nivel inmediatamente anterior (de menor dispersión) será necesario haber obtenido resultados del recorrido relativo inferior o igual al máximo de la tabla en cinco lotes consecutivos, pudiéndose aplicar al quinto resultado y a los siguientes ya el nuevo coeficiente K_N .

TABLA 21.2 VALORES DE K_N

TABLA 2.1.2 VALORES DE K_N								
N	HORMIGONES FABRICADOS EN CENTRAL							OTROS CASOS
	CLASE A			CLASE B		CLASE C		
	Recorrido relativo máximo, r	K_N		Recorrido relativo máximo, r	K_N	Recorrido relativo máximo, r	K_N	
Con Sello o Marca de Calidad		Sin Sello o Marca de Calidad						
2	0,29	0,93	0,90	0,40	0,85	0,50	0,81	0,75
3	0,31	0,95	0,92	0,46	0,88	0,57	0,85	0,80
4	0,34	0,97	0,94	0,49	0,90	0,61	0,88	0,84
5	0,36	0,98	0,95	0,53	0,92	0,66	0,90	0,87
6	0,38	0,99	0,96	0,55	0,94	0,68	0,92	0,89
7	0,39	1,00	0,97	0,57	0,95	0,71	0,93	0,91
8	0,40	1,00	0,97	0,59	0,96	0,73	0,95	0,93

r = recorrido absoluto / valor medio de la serie

Recorrido absoluto = diferencia entre los dos valores extremos de la serie

Fuente: referencia 1

Las plantas se clasifican de acuerdo con lo siguiente:

- La clase A se corresponde con instalaciones con un valor del coeficiente de variación δ comprendido entre 0,08 y 0,13.
- La clase B se corresponde con instalaciones con un valor del coeficiente de variación δ comprendido entre 0,13 y 0,16.
- La clase C se corresponde con instalaciones con un valor del coeficiente de variación δ comprendido entre 0,16 y 0,20.
- Otros casos incluye las hormigoneras con un valor del coeficiente de variación δ comprendido entre 0,20 y 0,25.

La de terminación de δ se explica en el apartado 11.3.1.1º

21.6.4. DECISIONES DERIVADAS DEL CONTROL DE RESISTENCIA

Cuando en un lote de obra sometida a control de resistencia $f_{est} \geq f_{ck}$, tal lote se aceptará. Si resultase

$f_{est} < f_{ck}$, a falta de una explícita previsión del caso en el Pliego de Especificaciones Técnicas de la obra, se procederá como sigue:

1. Si $f_{est} \geq 0,9 f_{ck}$, el lote se aceptará.
2. Si $f_{est} < 0,9 f_{ck}$, se procederá a realizar, por decisión de la Dirección de Obra o a petición de cualquiera de las partes, los estudios y ensayos que procedan de entre los detallados seguidamente; en cuyo caso la base de juicio se trasladará al resultado de estos últimos.
 - Estudio de la seguridad de los elementos que componen el lote, en función de la f_{est} deducida de los ensayos de control, para estimar la variación del coeficiente de seguridad respecto del previsto en el Proyecto.
 - Ensayos de información complementaria para estimar la resistencia del hormigón puesto en obra, de acuerdo con lo especificado en el punto 21.7, y realizando en su caso un estudio análogo al mencionado en el párrafo anterior, basado en los nuevos valores de resistencia obtenidos.
 - Ensayos de puesta en carga (prueba de carga), 21.10.1. La carga de ensayo podrá exceder el valor característico de la carga tenida en cuenta en el cálculo.

En función de los estudios y ensayos ordenados por la Dirección de Obra y con la información adicional que el Constructor pueda aportar, aquél decidirá si los elementos que componen el lote se aceptan, refuerzan o demuelen, habida cuenta también de los requisitos referentes a la durabilidad y a los Estados Límite de Servicio.

21.7. ENSAYOS DE INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DEL HORMIGÓN

Su objeto es estimar la resistencia del hormigón de una parte determinada de la obra, a una cierta edad o tras un curado, en condiciones análogas a las de la obra.

Los ensayos de información del hormigón pueden consistir en:

- La fabricación y rotura de probetas, en forma análoga a la indicada para los ensayos de control, pero conservando las probetas no en condiciones normalizadas, sino en las que sean lo más parecidas posible a aquéllas en las que se encuentra el hormigón cuya resistencia se pretende estimar.
- La rotura de probetas testigo (pto. 12.3.1.3) extraídas del hormigón endurecido. Esta forma de ensayo no deberá realizarse cuando dicha extracción afecte de un modo sensible a la capacidad resistente del elemento en estudio, hasta el punto de resultar un riesgo inaceptable. En estos casos puede estudiarse la posibilidad de realizar el apeo del elemento, previamente a la extracción.
- El empleo de métodos no destructivos (pto. 12.3.1.4) fiables, como complemento de los anteriormente descritos y debidamente correlacionados con los mismos.

La Dirección de Obra juzgará en cada caso los resultados, teniendo en cuenta que para la obtención de resultados fiables la realización, siempre delicada de estos ensayos, deberá estar a cargo de personal especializado.

21.8. CONTROL DE LA CALIDAD DEL ACERO

21.8.1. GENERALIDADES

Se establecen los siguientes niveles para controlar la calidad del acero:

- Control a nivel reducido.
- Control a nivel normal.

En obras de hormigón pretensado sólo podrá emplearse el nivel de control normal, tanto para las armaduras activas como para las pasivas.

Se denomina partida al material de la misma clase de acero (aunque de varios diámetros) suministrado de una vez. Lote es la subdivisión que se realiza de una partida, o del material existente en obra o taller en un momento dado. No podrán utilizarse partidas de acero que no lleguen acompañadas del certificado de garantía del fabricante, firmado por persona física.

El control planteado debe realizarse antes de la puesta en servicio de la estructura.

21.8.2. CONTROL A NIVEL REDUCIDO

Este nivel de control, que sólo será aplicable para armaduras pasivas, se contempla en aquellos casos en los que el consumo de acero de la obra es muy reducido o cuando existen dificultades para realizar ensayos completos sobre el material. En estos casos, el acero a utilizar estará certificado y se

utilizará como resistencia de cálculo el valor: $0,75 \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$

El control consiste en comprobar, sobre cada diámetro:

- Que la sección equivalente cumple lo especificado en 5.5 de este texto, realizándose dos comprobaciones por cada partida de material suministrado a obra.
- Que no se formen grietas o fisuras en las zonas de doblado y ganchos de anclaje, mediante inspección en obra.

21.8.3. CONTROL A NIVEL NORMAL

Este nivel de control se aplica a todas las armaduras, tanto activas como pasivas, distinguiéndose los casos indicados en 21.8.3.1 y 21.8.3.2.

En el caso de las armaduras pasivas, todo el acero de la misma designación que entregue un mismo suministrador se clasificará, según su diámetro, en serie fina (diámetros inferiores o iguales a 10 mm),

serie media (diámetros 12 a 25 mm) y serie gruesa (superior a 25 mm). En el caso de armaduras activas, el acero se clasificará según este mismo criterio, aplicado al diámetro nominal de las armaduras.

21.8.3.1. PRODUCTOS CERTIFICADOS

Para aquellos aceros que estén certificados, los ensayos de control no constituyen en este caso un control de recepción en sentido estricto, sino un control externo complementario de la certificación, dada la gran responsabilidad estructural del acero. Los resultados del control del acero deben ser conocidos antes de la puesta en uso de la estructura.

A efectos de control, las armaduras se dividirán en lotes, correspondientes cada uno a un mismo suministrador, designación y serie, y siendo su cantidad máxima de 40 toneladas o fracción en el caso de armaduras pasivas, y 20 toneladas o fracción en el caso de armaduras activas.

Para la realización de este tipo de control se procederá de la siguiente manera:

- Se tomarán dos probetas por cada lote, para:
 - Comprobar que la sección equivalente cumple lo especificado para (armaduras pasivas) o (armaduras activas), según sea el caso.
 - En el caso de barras corrugadas comprobar que las características geométricas de sus resaltos están comprendidas entre los límites admisibles establecidos en el certificado específico de adherencia (pto. 5.4.2).
 - Realizar, después de enderezado, el ensayo de doblado-desdoblado (pto. 5.7.3) según el tipo de armadura pasiva, alambres de pretensado o el ensayo de doblado indicado en barras de pretensado según sea el caso.
- Se determinarán, al menos en dos ocasiones durante la realización de la obra, el límite elástico, carga de rotura y alargamiento (en rotura, para las armaduras pasivas; bajo carga máxima, para las activas) como mínimo en una probeta de cada diámetro y tipo de acero empleado y suministrador. En el caso particular de las mallas electrosoldadas se realizarán, como mínimo, dos ensayos por cada diámetro principal empleado en cada una de las dos ocasiones; y dichos ensayos incluirán la resistencia al arrancamiento del nudo soldado.
- En el caso de existir empalmes por soldadura en armaduras pasivas, se comprobará, de acuerdo con lo especificado en 21.8.5, la soldabilidad.

21.8.4. COMPROBACIÓN DE LA SOLDABILIDAD

En el caso de existir empalmes por soldadura, se deberá comprobar que el material posee la composición química apta para la soldabilidad, así como comprobar la aptitud del procedimiento de soldeo, de acuerdo con lo que sigue.

a) **Soldadura a tope.**- Este ensayo se realizará sobre los diámetros máximo y mínimo que se vayan a soldar. De cada diámetro se tomarán seis probetas consecutivas de una misma barra, realizándose

con tres los ensayos de tracción, y con las otras tres el ensayo de doblado-desdoblado, procediéndose de la siguiente manera:

- *Ensayo de tracción:* De las tres primeras probetas consecutivas tomadas para este ensayo, la central se ensayará soldada y las otras sin soldadura, determinando su carga total de rotura. El valor obtenido para la probeta soldada no presentará una disminución superior al 5% de la carga total de rotura media de las otras 2 probetas, ni será inferior a la carga de rotura garantizada.

De la comprobación de los diagramas fuerza-alargamiento correspondientes resultará que, para cualquier alargamiento, la fuerza correspondiente a la barra soldada no será inferior al 95% del valor obtenido del diagrama de la barra testigo del diagrama inferior.

La base de medida del extensómetro ha de ser, como mínimo, cuatro veces la longitud de la oliva.

- *Ensayo de doblado-desdoblado:* Se realizará sobre tres probetas soldadas, en la zona de afección del calor (HAZ) sobre el mandril de diámetro indicado en la Tabla 5.5.

b) **Soldadura por solapo.-** Este ensayo se realizará sobre la combinación de diámetros más gruesos a soldar, y sobre la combinación de diámetro más fino y más grueso. Se ejecutarán en cada caso tres uniones, realizándose el ensayo de tracción sobre ellas. El resultado se considerará satisfactorio si, en todos los casos, la rotura ocurre fuera de la zona de solapo o, en el caso de ocurrir en la zona soldada, no presenta una baja del 10% en la carga de rotura con respecto a la media determinada sobre tres probetas del diámetro más fino procedente de la misma barra que se haya utilizado para obtener las probetas soldadas, y en ningún caso por debajo del valor nominal.

c) **Soldadura en cruz.-** Se utilizarán tres probetas, resultantes de la combinación del diámetro más grueso y del diámetro más fino, ensayando a tracción los diámetros más finos. El resultado se considerará satisfactorio si, en todos los casos la rotura no presenta una baja del 10% en la carga de rotura con respecto a la media determinada sobre tres probetas de ese diámetro, y procedentes de la misma barra que se haya utilizado para obtener las probetas soldadas, y en ningún caso por debajo del valor nominal.

Asimismo se deberá comprobar, sobre otras tres probetas, la aptitud frente al ensayo de arrancamiento de la cruz soldada, realizando la tracción sobre el diámetro más fino.

d) **Otro tipo de soldaduras.-** En el caso de que existan otro tipo de empalmes o uniones resistentes soldadas distintas de las anteriores, la Dirección de Obra deberá exigir que se realicen ensayos de comprobación al soldeo para cada tipo, antes de admitir su utilización en obra.

21.8.5. CONDICIONES DE ACEPTACIÓN O RECHAZO DE LOS ACEROS

Según los resultados de ensayo obtenidos, la Dirección de Obra se ajustará a los siguientes criterios de aceptación o rechazo que figuran a continuación. Otros criterios de aceptación o rechazo, en casos particulares, se fijarán en el Pliego de especificaciones Técnicas o por la Dirección de Obra.

a) **Control a nivel reducido.-** Comprobación de la sección equivalente: Si las dos comprobaciones que han sido realizadas resultan satisfactorias, la partida quedará aceptada. Si las dos resultan no satisfactorias, la partida será rechazada. Si se registra un sólo resultado no satisfactorio, se comprobarán cuatro nuevas muestras correspondientes a la partida que se controla. Si alguna de estas nuevas cuatro comprobaciones resulta no satisfactoria, la partida será rechazada. En caso contrario, será aceptada.

Formación de grietas o fisuras en los ganchos de anclaje: La aparición de grietas o fisuras en los ganchos de anclaje o zonas de doblado de cualquier barra, obligará a rechazar toda la partida a la que corresponda la misma.

b) **Control a nivel normal.-**

- Comprobación de la sección equivalente: Se efectuará igual que en el caso de control a nivel reducido.
- Características geométricas de los resaltos de las barras corrugadas: El incumplimiento de los límites admisibles establecidos en el certificado específico de adherencia será condición suficiente para que se rechace el lote correspondiente.
- Ensayos de doblado-desdoblado: Si se produce algún fallo, se someterán a ensayo cuatro nuevas probetas del lote correspondiente. Cualquier fallo registrado en estos nuevos ensayos obligará a rechazar el lote correspondiente.
- Ensayos de tracción para determinar el límite elástico, la carga de rotura y el alargamiento en rotura: Mientras los resultados de los ensayos sean satisfactorios, se aceptarán las barras del diámetro correspondiente. Si se registra algún fallo, todas las armaduras de ese mismo diámetro existentes en obra y las que posteriormente se reciban, serán clasificadas en lotes correspondientes a las diferentes partidas suministradas, sin que cada lote exceda de las 20 toneladas para las armaduras pasivas y 10 toneladas para las armaduras activas. Cada lote será controlado mediante ensayos sobre dos probetas. Si los resultados de ambos ensayos son satisfactorios, el lote será aceptado. Si los dos resultados fuesen no satisfactorios, el lote será rechazado, y si solamente uno de ellos resulta no satisfactorio, se efectuará un nuevo ensayo completo de todas las características mecánicas que deben comprobarse sobre 16 probetas. El

resultado se considerará satisfactorio si la media aritmética de los dos resultados más bajos obtenidos supera el valor garantizado y todos los resultados superan el 95% de dicho valor. En caso contrario el lote será rechazado.

- Ensayos de soldeo: En caso de registrarse algún fallo en el control del soldeo en obra, se interrumpirán las operaciones de soldadura y se procederá a una revisión completa de todo el proceso.

21.9. CONTROL DE LA EJECUCIÓN

21.9.1. GENERALIDADES

El Control de la Ejecución, tiene por objeto garantizar que la obra se ajusta al proyecto y a las especificaciones de la norma. Corresponde a la Propiedad y a la Dirección de Obra la responsabilidad de asegurar la realización del control externo de la ejecución.

Se consideran los tres siguientes niveles para la realización del control de la ejecución:

- Control de ejecución a nivel reducido.
- Control de ejecución a nivel normal.
- Control de ejecución a nivel intenso.

que están relacionados con el coeficiente de mayoración de acciones empleado para el proyecto.

Para el control de ejecución se redactará un Plan de Control, dividiendo la obra en lotes, de acuerdo con lo indicado en la tabla 21.3.

TABLA 21.3 TAMAÑO DEL LOTE SEGÚN EL TIPO DE OBRA

TIPO DE OBRA	TAMAÑO DEL LOTE
Edificios	500 m ² , sin rebasar las dos plantas
Puentes, Acueductos, Túneles, etc.	500 m ² de planta, sin rebasar los 50 m
Obras de Grandes Macizos	250 m ³
Chimeneas, Torres, Pilas, etc.	250 m ³ , sin rebasar los 50 m
Piezas prefabricadas:	
- De tipo lineal	500 m de bancada
- De tipo superficial	250 m

Fuente referencia 1

En cada lote se inspeccionarán los distintos aspectos que, a título orientativo pero no excluyente, se detallan a continuación:

COMPROBACIONES QUE DEBEN EFECTUARSE DURANTE LA EJECUCIÓN

Generales para Todo Tipo de Obras

A) COMPROBACIONES PREVIAS AL COMIENZO DE LA EJECUCIÓN

- Directorio de agentes involucrados.
- Existencia de libros de registro y órdenes reglamentarios.

- Existencia de archivo de certificados de materiales, hojas de suministro, resultados de control, documentos de proyecto y sistema de clasificación de cambios de proyecto o información

- complementaria.
- Revisión de planos y documentos contractuales.
- Existencia de control de calidad de materiales de acuerdo con los niveles especificados.
- Comprobación general de equipos: certificados de tarado, en su caso.
- Suministro y certificados de aptitud de materiales.
- B) COMPROBACIONES DE REPLANTEO Y GEOMÉTRICAS
 - Comprobación de cotas, niveles y geometría.
 - Comprobación de tolerancias admisibles.
- C) CIMBRAS Y ANDAMIAJES
 - Existencia de cálculo, en los casos necesarios.
 - Comprobación de planos.
 - Comprobación de cotas y tolerancias.
 - Revisión del montaje.
- D) ARMADURAS
 - Tipo, diámetro y posición.
 - Corte y doblado.
 - Almacenamiento.
 - Tolerancias de colocación.
 - Recubrimientos y separación entre armaduras.
 - Utilización de separadores y distanciadores.
 - Estado de vainas, anclajes y empalmes y accesorios.
- E) ENCOFRADOS
 - Estandaridad, rigidez y textura.
 - Tolerancias.
 - Posibilidad de limpieza, incluidos fondos.
 - Geometría y contraflechas.
- F) TRANSPORTE, VERTIDO Y COMPACTACIÓN
 - Tiempos de transporte.
 - Condiciones de vertido: método, secuencia, altura máxima, etc.
 - Hormigonado con viento, tiempo frío, tiempo caluroso o lluvia.
 - Compactación del hormigón.
 - Acabado de superficies.
- G) JUNTAS DE TRABAJO, CONTRACCIÓN O DILATACIÓN
 - Disposición y tratamiento de juntas de trabajo y contracción.
 - Limpieza de las superficies de contacto.
 - Tiempo de espera.
 - Armaduras de conexión.
 - Posición, inclinación y distancia.
 - Dimensiones y sellado, en los casos que proceda.
- H) CURADO
 - Método aplicado.
 - Plazos de curado.
 - Protección de superficies.
- I) DESMOLDEADO Y DESCIMBRADO
 - Control de la resistencia del hormigón antes del tesado.
 - Control de sobrecargas de construcción.
 - Comprobación de plazos de descimbrado.

- Reparación de defectos.
- J) TESADO DE ARMADURAS ACTIVAS
 - Programa de tesado y alargamiento de armaduras activas.
 - Comprobación de deslizamientos y anclajes.
 - Inyección de vainas y protección de anclajes.
- K) TOLERANCIAS Y DIMENSIONES FINALES
 - Comprobación dimensional.
- L) REPARACIÓN DE DEFECTOS Y LIMPIEZA DE SUPERFICIES
- Específicas para Forjados de Edificación**
 - Comprobación de la Autorización de Uso vigente.
 - Dimensiones de macizados, ábacos y capiteles.
 - Condiciones de enlace de los nervios.
 - Comprobación geométrica del perímetro crítico de rasante.
 - Espesor de la losa superior.
 - Canto total.
 - Huecos: posición, dimensiones y solución estructural.
 - Armaduras de reparto.
 - Separadores.
- Específicas de Prefabricación**
- A) ESTADO DE BANCADAS
 - Limpieza.
- B) COLOCACIÓN DE TENDONES
 - Placas de desvío.
 - Trazado de cables.
 - Separadores y empalmes.
 - Cabezas de tesado.
 - Cuñas de anclaje.
- C) TESADO
 - Comprobación de la resistencia del hormigón antes de la transferencia.
 - Comprobación de cargas.
 - Programa de tesado y alargamientos.
 - Transferencia.
 - Corte de tendones.
- D) MOLDES
 - Limpieza y desencofrantes.
 - Colocación.
- E) CURADO
 - Ciclo térmico.
 - Protección de piezas.
- F) DESMOLDEO Y ALMACENAMIENTO
 - Levantamiento de piezas.
 - Almacenamiento en fábrica.
- G) TRANSPORTE A OBRA Y MONTAJE
 - Elementos de suspensión y cuelgue.
 - Situación durante el transporte.
 - Operaciones de carga y descarga.
 - Métodos de montaje.
 - Almacenamiento en obra.
 - Comprobación del montaje

Los resultados de todas las inspecciones, así como las medidas correctoras adoptadas, se recogerán en los correspondientes partes o informes. Estos documentos quedarán recogidos en la

Documentación Final de la Obra, que deberá entregar la Dirección de Obra a la Propiedad.

En las obras de hormigón pretensado, sólo podrán emplearse los niveles de control de ejecución normal e intenso.

21.9.2. CONTROL A NIVEL INTENSO

Exige que el Constructor posea un sistema de calidad propio, auditado de forma externa, y que la elaboración de la ferralla y los elementos prefabricados, en caso de existir, se realicen en instalaciones industriales fijas y con un sistema de certificación voluntario.

Si no se dan estas condiciones, la Dirección de Obra deberá exigir al Constructor unos procedimientos específicos para la realización de las distintas actividades de control interno involucradas en la construcción de la obra.

Para este nivel de control, externo, se exige la realización de, al menos, tres inspecciones por cada lote en los que se ha dividido la obra.

21.9.3. CONTROL A NIVEL NORMAL

Es de aplicación general y exige la realización de, al menos, dos inspecciones por cada lote en los que se ha dividido la obra.

21.9.4. CONTROL A NIVEL REDUCIDO

Es aplicable cuando no existe un seguimiento continuo y reiterativo de la obra y exige la realización de, al menos, una inspección por cada lote en los que se ha dividido la obra.

21.10. ENSAYOS DE INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DE LA ESTRUCTURA

En caso en que debido al carácter particular de la obra convenga comprobar que la misma reúne una vez terminada ciertas condiciones específicas, el pliego de Especificaciones Técnicas establecerá los ensayos oportunos que deben realizar, indicando con toda precisión la forma de realizarlos y el modo de interpretar los resultados.

Aparte de lo anterior, se realizarán pruebas de carga de la obra en los casos previstos a continuación.

21.10.1. PRUEBAS DE CARGA

Existen muchas situaciones que pueden aconsejar la realización de pruebas de carga de estructuras.

En general, las pruebas de carga pueden agruparse de acuerdo con su finalidad en:

A) Pruebas de carga reglamentarias.- Son todas aquellas fijadas por el Pliego de Especificaciones Técnicas o Instrucciones o Reglamentos, y que tratan de realizar un ensayo que constate el comportamiento de la estructura ante situaciones representativas de sus acciones de servicio. Las reglamentaciones de puentes de carretera y puentes de ferrocarril fijan, en todos los casos, la necesidad de realizar ensayos de puesta en carga previamente a la recepción de la obra. Estas pruebas tienen por objeto el comprobar la adecuada concepción y la buena ejecución de las obras frente a las cargas normales de explotación, comprobando si la obra se comporta según los supuestos de proyecto, garantizando con ello su funcionalidad.

Hay que añadir, además, que en las pruebas de carga se pueden obtener valiosos datos de investigación que deben confirmar las teorías de proyecto (reparto de cargas, giros de apoyos, flechas máximas) y utilizarse en futuros proyectos.

Estas pruebas no deben realizarse antes de que el hormigón haya alcanzado la resistencia de proyecto. Pueden contemplar diversos sistemas de carga, tanto estáticos como dinámicos.

Las pruebas dinámicas son preceptivas en puentes de ferrocarril y en puentes de carretera y estructuras en las que se prevea un considerable efecto de vibración, de acuerdo con las Instrucciones de acciones correspondientes. En particular, este último punto afecta a los puentes con luces superiores a los 60 m o diseño inusual, utilización de nuevos materiales y pasarelas y zonas de tránsito en las que, por su esbeltez, se prevé la aparición de vibraciones que puedan llegar a ocasionar molestias a los usuarios. El proyecto y realización de este tipo de ensayos deberá estar encomendado a equipos técnicos con experiencia en este tipo de pruebas.

La evaluación de las pruebas de carga reglamentarias requiere la previa preparación de un proyecto de Prueba de carga, que debe contemplar la diferencia de actuación de acciones (dinámica o estática) en cada caso. De forma general, y salvo justificación especial, se considerará el resultado satisfactorio cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- En el transcurso del ensayo no se producen fisuras que no se correspondan con lo previsto en el proyecto y que puedan comprometer la durabilidad y seguridad de la estructura.
- Las flechas medidas no exceden los valores establecidos en proyecto como máximos compatibles con la correcta utilización de la estructura.
- Las medidas experimentales determinadas en las pruebas (giros, flechas, frecuencias de vibración) no superan las máximas calculadas en el proyecto de prueba de carga en más de un 15% en caso de hormigón armado y en 10% en caso de hormigón pretensado.
- La flecha residual después de retirada la carga, habida cuenta del tiempo en que esta última se ha mantenido, es lo suficientemente pequeña como para estimar que la estructura presenta un

comportamiento esencialmente elástico. Esta condición deberá satisfacerse tras un primer ciclo carga-descarga, y en caso de no cumplirse, se admite que se cumplan los criterios tras un segundo ciclo.

B) Pruebas de carga como información complementaria.- En ocasiones es conveniente realizar pruebas de carga como ensayos para obtener información complementaria, en el caso de haberse producido cambios o problemas durante la construcción. Salvo que lo que se cuestione sea la seguridad de la estructura, en este tipo de ensayos no deben sobrepasarse las acciones de servicio, siguiendo unos criterios en cuanto a la realización, análisis e interpretación semejantes a los descritos en el caso anterior.

C) Pruebas de carga para evaluar la capacidad resistente.- En algunos casos las pruebas de carga pueden utilizarse como medio para evaluar la seguridad de estructuras. En estos casos la carga a materializar deberá ser una fracción de la carga de cálculo superior a la carga de servicio. Estas pruebas requieren siempre la redacción de un Plan de Ensayos que evalúe la viabilidad de la prueba, la realización de la misma por una organización con experiencia en este tipo de trabajos, y ser dirigida por un técnico competente.

El Plan de Prueba recogerá, entre otros, los siguientes aspectos:

- Viabilidad y finalidad de la prueba.
- Magnitudes que deben medirse y localización de los puntos de medida.
- Procedimientos de medida.
- Escalones de carga y descarga.
- Medidas de seguridad.

Este último punto es muy importante, dado que por su propia naturaleza en este tipo de pruebas se puede producir algún fallo o rotura parcial o total del elemento ensayado.

Estos ensayos tienen su aplicación fundamental en elementos sometidos a flexión. Para su realización deberán seguirse los siguientes criterios:

- Los elementos estructurales que sean objeto de ensayo deberán tener al menos 56 días de edad, o haberse comprobado que la resistencia real del hormigón de la estructura ha alcanzado los valores nominales previstos en proyecto.
- Siempre que sea posible, y si el elemento a probar va a estar sometido a cargas permanentes aún no materializadas, 48 horas antes del ensayo deberían disponerse las correspondientes cargas sustitutorias que gravitarán durante toda la prueba sobre el elemento ensayado.
- Las lecturas iniciales deberán efectuarse inmediatamente antes de disponer la carga de ensayo.
- La zona de estructura objeto de ensayo deberá someterse a una carga total, incluyendo las cargas permanentes que ya actúen, equivalente a $0,85 (1,35 G + 1,5 Q)$, siendo G la carga permanente que se ha determinado actúa sobre la estructura y Q las sobrecargas previstas.
- Las cargas de ensayo se dispondrán en al menos cuatro etapas aproximadamente iguales, evitando impactos sobre la estructura y la formación de arcos de descarga en los materiales

empleados para materializar la carga.

- 24 horas después de que se haya colocado la carga total de ensayo, se realizarán las lecturas en los puntos de medida previstos. Inmediatamente después de registrar dichas lecturas se iniciará la descarga, registrándose las lecturas existentes hasta 24 horas después de haber retirado la totalidad de las cargas.
- Se realizará un registro continuo de las condiciones de temperatura y humedad existentes durante el ensayo con objeto de realizar las oportunas correcciones si fuera pertinente.
- Durante las pruebas de carga deberán adoptarse las medidas de seguridad adecuadas para evitar un posible accidente en el transcurso de la prueba. Las medidas de seguridad no interferirán la prueba de carga ni afectarán a los resultados.

El resultado del ensayo podrá considerarse satisfactorio cuando se cumplan las condiciones siguientes:

- Ninguno de los elementos de la zona de estructura ensayada presenta fisuras no previstas y que comprometan la durabilidad o seguridad de la estructura.
- La flecha máxima obtenida es inferior de $l_2 / 20000 h$, siendo l la luz de cálculo y h el canto del elemento. En el caso de que el elemento ensayado sea un voladizo, l será dos veces la distancia entre el apoyo y el extremo.
- Si la flecha máxima supera $l_2 / 20000 h$, la flecha residual una vez retirada la carga, y transcurridas 24 horas, deberá ser inferior al 25 % de la máxima en elementos de hormigón armado e inferior al 20 % de la máxima en elementos de hormigón pretensado. Esta condición deberá satisfacerse tras el primer ciclo de carga-descarga. Si esto no se cumple, se permite realizar un segundo ciclo de carga-descarga después de transcurridas 72 horas de la finalización del primer ciclo. En tal caso, el resultado se considerará satisfactorio si la flecha residual obtenida es inferior al 20 % de la flecha máxima registrada en ese ciclo de carga, para todo tipo de estructuras.

21.10.2. OTROS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (PTO. 12.3.1.4)

Este tipo de ensayos se empleará para estimar en la estructura otras características del hormigón diferentes de su resistencia, o de las armaduras que pueden afectar a su seguridad o durabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. JIMENEZ MONTOYA P., GARCIA MESEGUER A. y MORAN CABRE F. (2000) "Hormigón Armado". 14ª ed., Gustavo Gili, SA, Barcelona.

ANEXO I

MANUAL SIKA
(ver CD adjunto)

ANEXO II

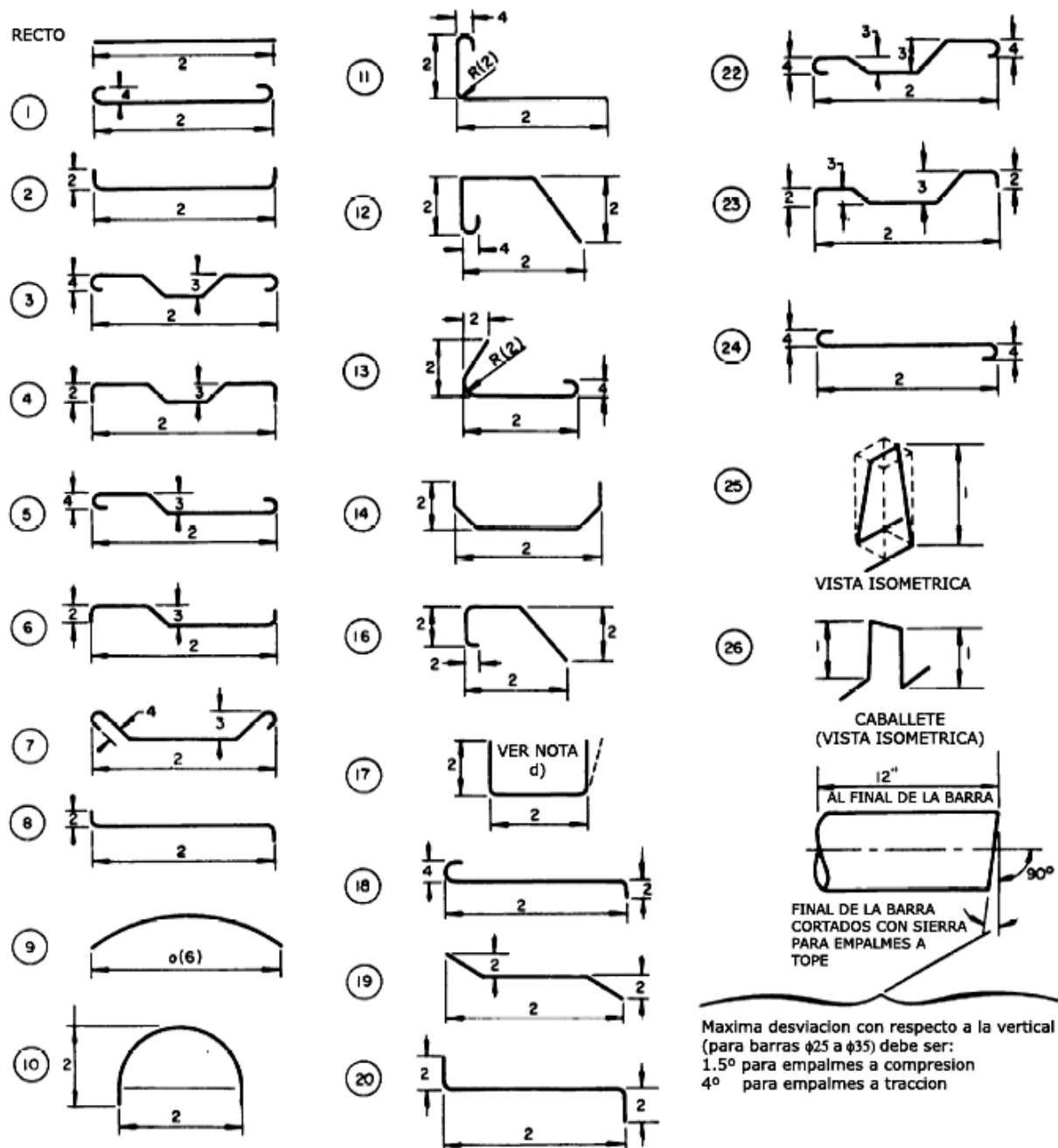
MANUAL DE LABORATORIO- ENSAYOS PARA EL HORMIGON (ver en CD adjunto)

ANEXO III

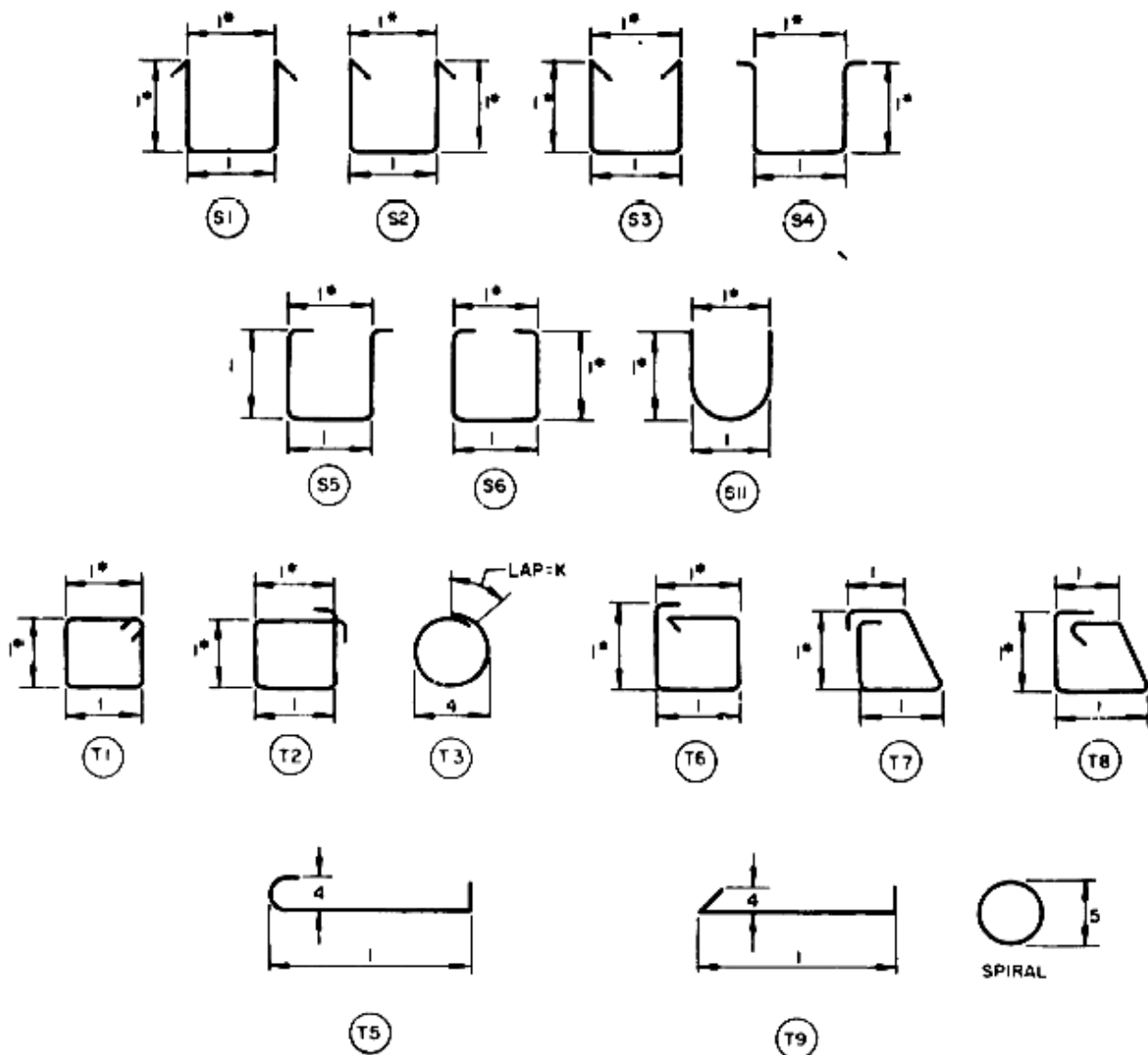
TOLERANCIAS PARA BARRAS DE REFUERZO

La ACI 117, provee de tolerancias para la construcción con Hormigón, tanto para los materiales, fundaciones, hormigón vaciado en sitio para edificios, hormigón prefabricado, mampostería y varios otras construcciones con hormigón.

En este anexo solo se presenta los requerimientos para el refuerzo de acero, en cuanto a tolerancia en las dimensiones se refiere, para más detalles, referirse al comité del ACI mencionado antes.



Tolerancias de fabricación para barras $\phi 9.5$ a $\phi 35$ mm



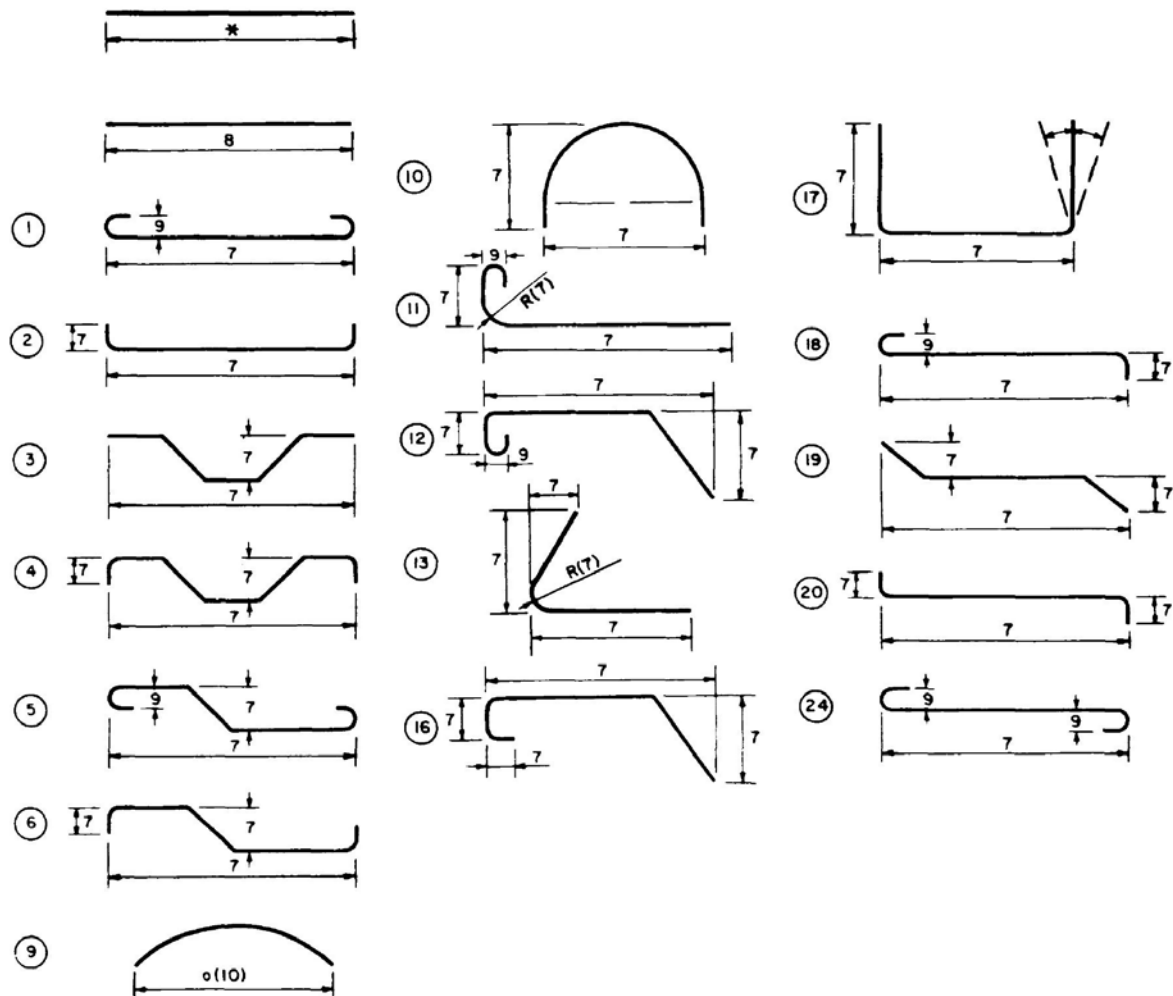
Tolerancias de fabricación para barras Ø9.5 a Ø35mm (cont.)

NOTAS:

a) todas las tolerancias en los tipos S1 a S11 y T1 a T9 se aplican solo para las barras Ø10 a Ø25

* Las dimensiones en esta línea deben estar dentro de la tolerancia mostrada pero no debe diferir de la dimensión paralela opuesta por más de 25mm.

- 1) barras Ø9.5, Ø12 y Ø16:
 - a. ±12mm cuando la longitud total de la barra < 3.65m
 - b. ±25mm cuando la longitud total de la barra > 3.65m
- 2) ±25mm
- 3) ±12mm
- 4) ±12mm
- 5) ±12mm para diámetros < 760mm
±25mm para diámetros > 760mm
- 6) ±1.5% de la dimensión mostrada



Tolerancias de fabricación para barras Ø45mm y Ø57mm

NOTAS:

- a) todas las tolerancias en los tipos S1 a S11 y T1 a T9 se aplican solo para las barras Ø10 a Ø25

* Las dimensiones en esta línea deben estar dentro de la tolerancia mostrada pero no debe diferir de la dimensión paralela opuesta por más de 25mm.

		Ø45	Ø57
7)	±	63mm	89mm
8)	±	50mm	50mm
9)	±	38mm	50mm
10)	± 2% de o ≥	63mm min.	89mm

ANEXO IV

HERRAMIENTAS PARA PUESTA EN OBRA

(ver en CD adjunto)

ANEXO V

ENCOFRADOS
(ver en CD adjunto)

ANEXO VI

CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES MARCAS DE CEMENTOS

FANCESA**TABLA 1 RESULTADOS ENSAYOS CEMENTO FANCESA**

		"Pionero"	Cemento Pórtland Tipo I-40		
		"Superior"	Cemento Pórtland con Pozolana Tipo IP-40		
		"Líder"	Cemento Pórtland con Pozolana Tipo IP-30		
			Cemento Pórtland Tipo I-30		
ENSAYOS FÍSICOS	Unid.	"Pionero"	"Superior"	"Líder"	I-30
Norma NB 062-95 Consistencia Normal (Agua/Cem.)	%	28.1	29.9	29.0	28.00
Norma NB 063-95 Tiempo inicial de fraguado	hh:mm	3:07	2:38	2:52	3:07
Tiempo final de fraguado	hh:mm	5:02	4:33	4:48	5:02
Norma NB 643-95 Expansión (Le-Chatelier C-A)	mm.	1.21	1.18	1.28	1.20
Norma NB 064-95 Densidad	g/cm ³	3.08	2.95	3.07	3.07
Norma NB 472-95 Finura (Blaine)	cm ² /g	3.822	4.215	3.788	3.838
Norma NB 473 Liquidez	%	NA	106.5	107.80	NA
ENSAYOS MECÁNICOS	Unid.	"Pionero"	"Superior"	"Líder"	I-30
Norma NB 470 Resistencia a la compresión 3 d.	MPa	26.3	19.9	23.0	24.0
7 d.	MPa	36.7	29.4	32.3	32.5
28 d.	MPa	46.2	36.7	41.8	39.1

Fuente: www.fancesa.com

COBOCE**TABLA 2 RESULTADOS ENSAYOS CEMENTO COBOCE**

		Certificado de Calidad (I 30)		Certificado de Calidad (IP 30)		Certificado de Calidad (I 40)		Certificado de Calidad (IP 40)	
PARAMETRO	UNID.	COBOC	NB-001	COBOC	NB-001	COBOC	NB-001	COBOC	NB-001
Análisis Químico									
P.P.I.	%	3.48	<5.00	3.02	<7.00	1.62	<5.00	2.96	<7.00
SiO ₂	%	21.81	-	35.32	-	26.46	-	22.06	-
Al ₂ O ₃	%	4.09	-	4.06	-	4.78	-	4.09	-
Fe ₂ O ₃	%	2.63	-	2.45	-	2.55	-	2.63	-
CaO	%	61.98	-	48.05	-	58.40	-	61.47	-
MgO	%	4.25	<=6.00	3.66	<=6.00	3.87	<=6.00	4.23	<=6.00
SO ₃	%	1.83	<=3.50	2.65	<=4.00	2.16	<3.50	2.03	<4.00
RI	%	2.09	3.00	-	-	-	3.00	1.88	-
Análisis Físico									
Inicio de Fraguado	Hr	3.16	0.75	3.16	>0.75	2.41	>0.75	2.45	>0.75
Final de Fraguado	Hr.	6.72	<10.00	6.66	<10.00	6.00	<10.00	5.77	<10.00
Blaine	cm ² /g	3456	<2600	4639	<2600	4599	<2600	4628	<2600
Residuo Tamiz No.200	%	10.71	-	2.32	-	1.64	-	2.36	-
Expansión	%	0.13	<=0.80	0.07	<=1.00	0.08	<=0.80	0.10	<=1.00
Resistencia 3 Días	Kg/cm ²	22	-	16	-	27	>=170	32	>=170
Resistencia 7 Días	Kg/cm ²	29	>=170	22	>=170	-	>=250	39	>=250
Resistencia 28 Días	Kg/cm ²	37	>=300	32	>=300	-		53	>=400

Fuente: www.coboce.com

SOBOCE (www.soboce.com)**EMISA**

Correspondiente al mes de Octubre-03 (Gest. 03)				N.B. IP-30	CEMENTO EMISA IP-30	N.B. IP-40	CEMENTO EMISA IP-40	N.B. I-30	CEMENTO EMISA PORTLAND
ANALISIS QUIMICOS	CaO	%			44.60		55.00		59.10
	Si O2	%			34.30		26.50		23.10
	Al2O3	%			8.30		6.80		6.40
	Fe2O3	%			2.90		3.20		3.10
	MgO	%		< 6.0	1.49	< 6.0	1.20	< 6.0	1.40
	K2O	%			1.60		1.57		1.20
	Na2O	%			0.90		0.50		0.50
	SO3	%		< 4.0	2.40	< 4.0	2.44	< 3.5	2.10
	LOI	%		< 7.0	2.60	< 7.0	1.90	< 5.0	2.30
	TOTAL	%			98.90		99.11		99.20
	RI	%			25.10		10.00	< 3.0	3.00
FASES DEL CLINKER	C3S	%			53.00		55.40		56.00
	C2S	%			18.10		17.50		17.50
	C3A	%			7.4		7.60		7.5
	C4AF	%			10.8		9.90		9
ENSAYOS FISICOS Y MECANICOS	Malla + 200	%			1.67		0.59		1.90
	PESO ESPECIFICO	gr/cc			2.90		2.88		2.88
	BLAINE COMUN	cm2/g		>2600	4222	>2600	4789	>2600	4100
	TIEMPO DE FRAGUADO	INICIAL	hs:min	> 0:45	02:23	> 0:45	01:54	> 0:45	02:30
		FINAL	hs:min	< 10:00	08:12	< 10:00	05:40	< 10:00	08:10
	EXPANSION LE CHAT.	mm.		< 10	< 1	< 10	< 1	< 10	< 2
	RESISTENCIAS A LA	A 3 DIAS	MPa		23.6	> 17	30.00		22.90
		A 7 DIAS	MPa	> 17	29.1	> 25	35.60	> 17	35.50
	COMPRESION	A 28 DIAS	MPa	> 30	36.70	> 40	42.50	> 30	39.00

EL PUENTE

Mes de Producción: Octubre de 2003			Promedio Mensual Oct-03	Norma Boliviana I - 30
ESPECIFICACIONES QUIMICAS	PPF	%	3.95	< 5.0
	Si O ₂	%	22.02	
	Al ₂ O ₃	%	4.93	
	Fe ₂ O ₃	%	3.22	
	Ca O	%	59.39	
	Mg O	%	3.76	< 6.0
	S O ₃	%	1.74	< 3.5
	R.L.	%	2.59	< 3.0
	Cal Libre	%	1.11	
	C ₃ S	%	31.74	
	C ₂ S	%	39.19	
	C ₃ A	%	7.62	
	C ₄ AF	%	9.80	
ESPECIFICACIONES FISICAS	BLAINE	cm ² /g.	3421	> 2600
	TIEMPO DE FRAGUADO	INICIAL	Hrs:Min	> 0:45
		FINAL	Hrs:Min	< 10:00
	EXPANSION LE CHATELIER	mm.	0.0	< 10
	FLUIDEZ	%	110.00	110 +/- 5
	RESIDUO	200 M	% Ret	
	MALLAS	325 M	% Ret	
	PESO ESPECIFICO	g./l.	3.14	
	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)	3 DIAS	MPa	18.06
		7 DIAS	MPa	> 17
		28 DIAS	MPa	> 30

VIACHA

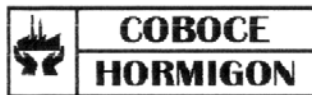
Octubre/2003(Definitivo G- 2003)				N. B. I-30	CEMENTO VIACHA NORMAL	N. B. IP-30	CEMENTO VIACHA ESTANDAR	N. B. IP-40	CEMENTO VIACHA ESPECIAL
ANALISIS QUIMICOS	CaO	%			61.46		46.97		55.87
	SiO ₂	%			20.59		33.86		26.99
	Al ₂ O ₃	%			4.55		6.99		5.80
	Fe ₂ O ₃	%			2.97		2.82		2.85
	MgO	%		< 6.0	1.69	< 6.0	1.36	< 6.0	1.54
	K ₂ O	%			1.07		2.21		1.64
	Na ₂ O	%			0.26		0.89		0.52
	SO ₃	%		< 3.5	2.11	< 4.0	1.95	< 4.0	2.02
	LOI	%		< 5.0	3.03	< 7.0	1.77	< 7.0	1.57
	TOTAL	%			98.51		99.43		99.47
	RI	%		< 3.0	3.07		24.83		11.86
	CaOlibre				2.35		2.00		2.09
FASES DEL CLINKER	C3S	%			58.02		55.74		57.27
	C2S	%			18.51		20.41		19.05
	C3A	%			7.62		7.96		7.82
	C4AF	%			10.38		10.10		10.17
ENSAYOS FISICOS Y MECANICOS	Malla + 325	%			9.52		7.81		5.51
	PESO ESPECIFICO	gr/cc			3.0341		2.8742		3.0075
	BLAINE COMUN	cm ² /g		> 2600	3338	> 2600	3293	> 2600	3594
	TIEMPO DE FRAGUADO	INICIAL	hs:min	> 0:45	02:57	> 0:45	03:14	> 0:45	03:01
		FINAL	hs:min	< 10:00	06:17	< 10:00	06:32	< 10:00	06:21
	EXPANSION LE CHAT.	mm		< 10	0.50	< 10	0.57	< 10	0.48
	RESISTENCIAS A LA COMPRESION	A 3 DIAS	MPa		29.85		21.97	> 17	30.80
		A 7 DIAS	MPa	> 17	38.45	> 17	29.44	> 25	37.75
		A 28 DIA	MPa	> 30	42.45	> 30	35.85	> 40	45.13

WARNES

CEMENTO DE PRODUCCIÓN, ENVASE Y CLINKER							
Octubre/03 Definitivo			NORMA BOLIVIANA I-30	CEMENTO WARNES NORMAL	NORMA BOLIVIANA IP-40	CEMENTO WARNES ESPECIAL	
ANÁLISIS QUÍMICOS	CaO	%				54.42	
	SiO2	%				28.72	
	Al2O3	%				4.43	
	Fe2O3	%				3.24	
	MgO	%	< 6.00		< 6.00	2.16	
	SO3	%	< 3.50		< 4.00	2.32	
	Pérdida Por Calcinación	%	< 5.00		< 7.00	3.25	
	TOTAL (Sin Alcalinos)	%		0.00		98.56	
	Residuo Insoluble	%	< 3.00			10.28	
FASES DEL CLINKER	C3S	%				58.76	
	C2S	%				17.98	
	C3A	%				7.15	
	C4AF	%				8.75	
ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS	SUPERFICIE ESPECÍFICA		cm ² /g	> 2800		> 2800	3363
	RETENIDO MALLA 325		%				10.58
	TIEMPO DE FRAGUADO	INICIAL	h:min	> 00:45		> 00:45	03:06
		FINAL	h:min	< 10:00		< 10:00	07:06
	EXPANSION LECHATLIER		mm	< 10.00		< 10.00	0.69
	RESISTENCIAS	3 DIAS	MPa			> 17.00	28
	A LA	7 DIAS	MPa	> 17.00		> 25.00	36
	COMPRESION	28 DIAS	MPa	> 30.00		> 40.00	43

ANEXO VII

RESULTADOS DE ENSAYOS DE AGREGADOS PARA EL HORMIGON



Laboratorio COBOCE Hormigón

Día	Fecha	Mes	Año
jueves	5	agosto	2004

FORM DH-005
Análisis Granulométrico

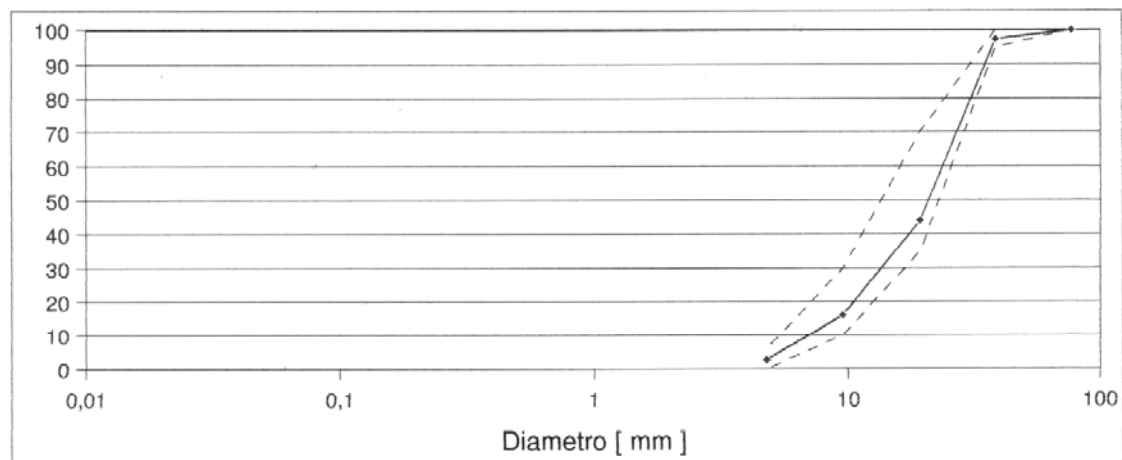
MUESTRA : Grava 1 1/2"

PROCEDENCIA Río Arque (Acopio Planta)

PESO TOTAL: 18590 [gr.]

Entregado en fecha: 9/08/04

TAMIZ		PESO RET [gr.]	RETENIDO ACUMULADO		% QUE PASA	ESPECIFICACION
NUMERO	DIAMETRO [mm]		[gr.]	%		
2 "	76,2	0,00	0,00	0,0	100,0	100
1 1/2 "	38,1	500,00	500,00	2,7	97,3	95 -- 100
3/4 "	19,1	9915,00	10415,00	56,0	44,0	35 -- 70
3/8 "	9,52	5190,00	15605,00	83,9	16,1	10 -- 30
4	4,76	2495,00	18100,00	97,4	2,6	0 -- 6



GRAVA	
Fina	Gruesa

Módulo de fineza = 7,40

Laboratorista:		Jefe Técnico	
Jose Herbas		Ing. Edson Alcócer A.	
Nombre	Firma	Nombre	Firma

Nota.— Los ensayos fueron efectuados por los Univ. Mariela Quiroz C. y Lucas Salamanca O.



Día	Fecha	Mes	Año
jueves	5	agosto	2004

Laboratorio COBOCE Hormigón

FORM DH-005**Análisis Granulométrico**

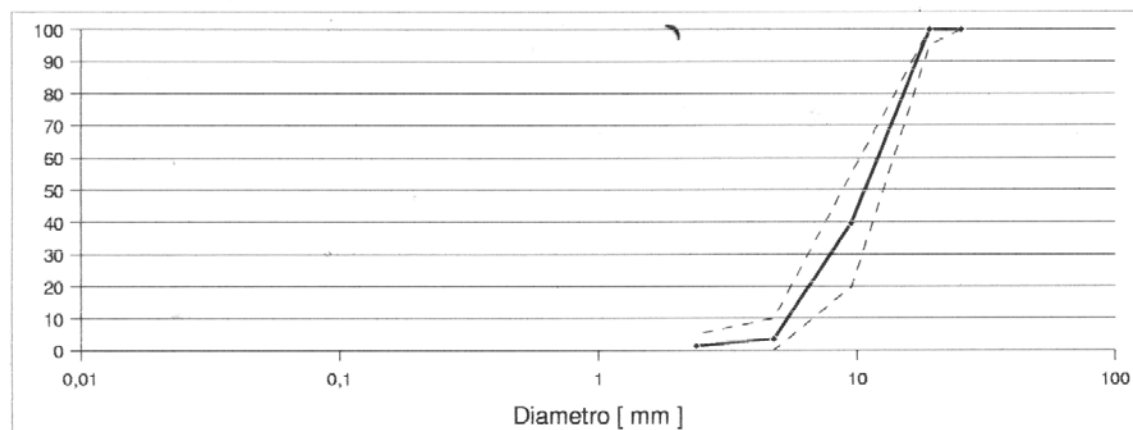
MUESTRA : Grava ¾"

PROCEDENCIA Río Arque (Acopio Planta)

Peso Total: 6200 [gr.]

Entregado en fecha: 9/08/04

TAMIZ		PESO RET [gr.]	RETENIDO ACUMULADO		% QUE PASA	ESPECIFICACION
NUMERO	DIAMETRO [mm]		[gr.]	%		
1 "	25,4	0,00	0,00	0,0	100,0	100
3/4 "	19,1	0,00	0,00	0,0	100,0	95 - 100
3/8 "	9,52	3745,00	3745,00	60,4	39,6	20 - 55
4	4,76	2235,00	5980,00	96,5	3,5	0 - 10
8	2,38	135,00	6115,00	98,6	1,4	0 - 5



GRAVA	
Fina	Gruesa

Modulo de fineza = 6,55

Laboratorista:		Jefe Técnico	
Jose Herbas		Ing. Edson Alcócer A.	
Nombre	Firma	Nombre	Firma

Nota. – Los ensayos fueron efectuados por los Univ. Mariela Quiroz C. y Lucas Salamanca O.



Laboratorio COBOCE Hormigón

Día	Fecha	Mes	Año
jueves	5	agosto	2004

FORM DH-005
Análisis Granulométrico

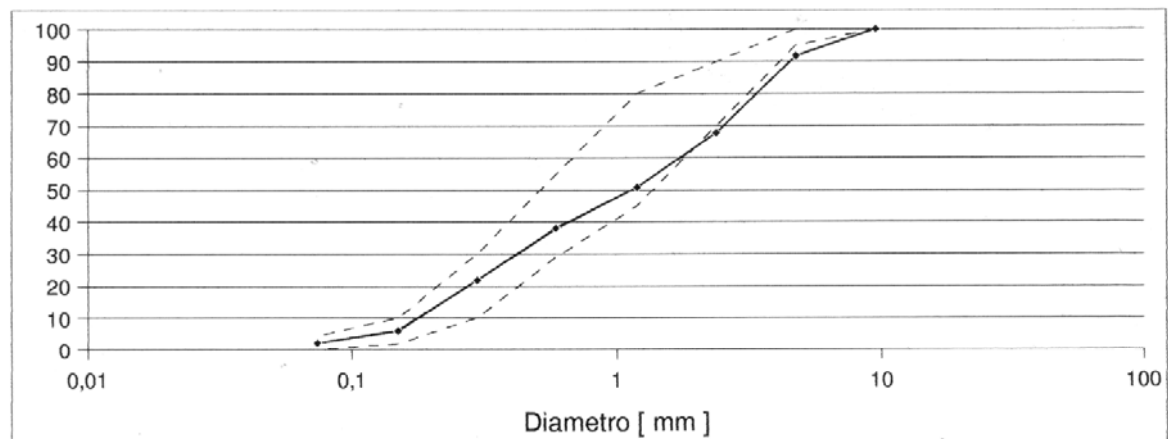
MUESTRA : Arena

PROCEDENCIA : Acopio Planta

Peso Total: 797,0 [gr.]

Entregado en fecha: 9/08/04

TAMIZ		PESO RET [gr.]	RETENIDO ACUMULADO		% QUE PASA	ESPECIFICACION
NUMERO	DIAMETRO [mm]		[gr.]	%		
3/8 "	9,52	0,00	0,00	0,0	100,0	100
4	4,76	65,50	65,50	8,2	91,8	95 - 100
8	2,38	191,50	257,00	32,2	67,8	-
16	1,19	134,30	391,30	49,1	50,9	45 - 80
30	0,59	102,50	493,80	62,0	38,0	-
50	0,3	129,20	623,00	78,2	21,8	10 - 30
100	0,15	125,80	748,80	94,0	6,0	2 - 10
200	0,07	30,50	779,30	97,8	2,2	0 - 4,5



ARENA		
Fina	Media	Gruesa

Módulo de fineza = 3,24

Laboratorista:		Jefe Técnico	
Jose Herbas		Ing. Edson Alcócer A.	
Nombre	Firma	Nombre	Firma

Nota 1.– Se recomienda reducir el agregado retenido en tamiz N° 4 (4,76 mm).**Nota 2.**– Los ensayos fueron efectuados por los Univ. Mariela Quiroz C. y Lucas Salamanca O.



Laboratorio COBOCE Hormigón

Día	Fecha	Mes	Año
jueves	5	agosto	2004

FORM DH-005
Análisis Granulométrico

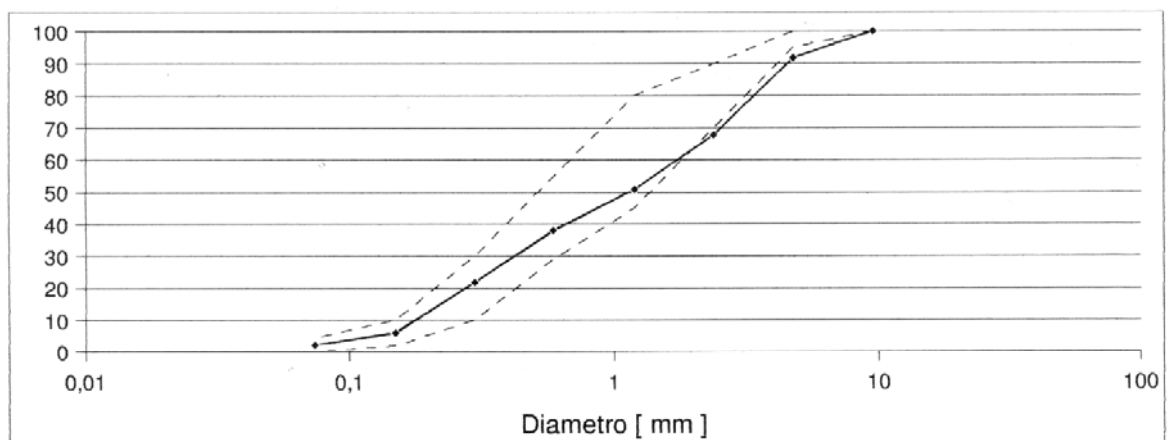
MUESTRA : Arena

PROCEDENCIA : Río Arque (Acopio Planta)

Peso Total: 797,0 [gr.]

Entregado en fecha: 9/08/04

TAMIZ		PESO RET [gr.]	RETENIDO ACUMULADO		% QUE PASA	ESPECIFICACION
NUMERO	DIAMETRO [mm]		[gr.]	%		
3/8 "	9,52	0,00	0,00	0,0	100,0	100
4	4,76	65,50	65,50	8,2	91,8	95 – 100
8	2,38	191,50	257,00	32,2	67,8	–
16	1,19	134,30	391,30	49,1	50,9	45 – 80
30	0,59	102,50	493,80	62,0	38,0	–
50	0,3	129,20	623,00	78,2	21,8	10 – 30
100	0,15	125,80	748,80	94,0	6,0	2 – 10
200	0,07	30,50	779,30	97,8	2,2	0 – 4,5



ARENA		
Fina	Media	Gruesa

Módulo de fineza = 3,24

Laboratorista:		Jefe Técnico	
Jose Herbas		Ing. Edson Alcócer A.	
Nombre	Firma	Nombre	Firma

Nota 1.– Se recomienda reducir el agregado retenido en tamiz N° 4 (4,76 mm).**Nota 2.**– Los ensayos fueron efectuados por los Univ. Mariela Quiroz C. y Lucas Salamanca O.



FORM DH-004

Día	Fecha	Mes	Año
lunes	9	agosto	2004

Peso Específico y Absorción de Agregados para Hormigón

Procedencia: Río Arque

Descripción del Agregado: Canto rodado

En fecha: 10/08/04

Agregado Grueso

Ensayo N°: 001

Muestra N°	1	2	3	4	5	6	7
P. Muestra Saturada Superficialmente B=	5169						
P. Muestra + Canastillo Sumergidos C1=	4169						
Peso Canastilla Sumergida C2=	968						
Peso Muestra Sumergida C=C1-C2=	3201						
Peso Igual Volumen de Agua D = B - C=	1968						
Peso Específico Pe = B/D=	2,63						
Peso Específico Promedio Pc=	2,63						
Peso Muestra Seca al Horno A=	5091						
Peso del Agua Absorbida E = B - A=	78,0						
Absorción en Porcentaje % (E/A)*100=	1,53%						
Absorción Promedio en Porcentaje =	1,53%						

Laboratorista	Jefe Técnico
José Herbas	Ing. Edson Aleócer A.
Nombre	Nombre
	Firma



FORM DH-004

Día	Fecha	Mes	Año
lunes	9	agosto	2004

Peso Específico y Absorción de Agregados para Hormigón

Procedencia: Río Arque

Descripción del Agregado: Arena de río

En fecha: 10/08/04

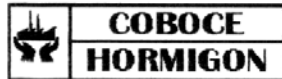
Agregado Fino

Ensayo N°: 001

Muestra N°	1	2	3	4	5	6	7
Peso Frasco Volumétrico Vacío B=	94,6	91,8					
Peso Frasco Lleno de Agua C=	343,5	341,0					
P. Muestra Saturada Sup. Seca D=	100,0	100,0					
Peso Frasco + Muestra + Agua E=	405,4	402,8					
Peso Agua Añadida W = E - B - D=	210,8	211,0					
Capacidad del Frasco V = C - B=	248,9	249,2					
Peso Igual Volumen de Agua G = V - W=	38,1	38,2					
Peso Específico Pe = D/G=	2,62	2,62					
Peso Específico Promedio Pc =	2,62						
Peso Muestra Seca al Horno A=	97,7	97,7					
Peso del Agua Absorbida K = D - A=	2,3	2,3					
Absorción en Porcentaje % (K/A)*100=	2,4%	2,4%					
Absorción Promedio en Porcentaje =	2,4%						

Nota.- Los ensayos fueron efectuados por los Univ. Mariela Quiroz C. y Lucas Salamanca O.

Laboratorista:	Jefe Técnico
José Herbas	Ing. Edson Aleócer A.
Nombre	Nombre
	Firma



FORM DH-002 PESO UNITARIO VARILLADO

Día	Fecha	mes	Año
lunes	16	agosto	2004

Tipo de agregado: Arena
Procedencia: Río Arque

Muestra N° : 1 Ensayo N°: 001
Proporción: 100/0 En fecha: 16/08/2004

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
Peso Recipiente [gr]	730	730	730	730	730		
Volumen Recipiente [cm3]	2320	2320	2320	2320	2320		
Peso Recipiente + Muestra Compactada [gr]	5055	5005	5040	5055	5035		
Peso Muestra Compactada [gr]	4325	4275	4310	4325	4305		
Peso Unitario Compactado [gr/cm3]	1,864	1,843	1,858	1,864	1,856		

Promedio 1,857

Laboratorista:		Jefe Técnico
José Herbas		Ing. Edson Alcócer A.
Nombre	Firma	Nombre Firma



FORM DH-002 PESO UNITARIO VARILLADO

Día	Fecha	mes	Año
lunes	16	agosto	2004

Tipo de agregado: Grava 1 1/2"
Procedencia: Río Arque

Muestra N° : 1 Ensayo N°: 001
Proporción: 100/0 En fecha: 16/08/2004

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
Peso Recipiente [gr]	5940	5940	5940	5940	5940		
Volumen Recipiente [cm3]	9205	9205	9205	9205	9205		
Peso Recipiente + Muestra Compactada [gr]	22215	21975	21875	21855	21820		
Peso Muestra Compactada [gr]	16275	16035	15935	15915	15880		
Peso Unitario Compactado [gr/cm3]	1,768	1,742	1,731	1,729	1,725		

1,739

Laboratorista:		Jefe Técnico
José Herbas		Ing. Edson Alcócer A.
Nombre	Firma	Nombre Firma



FORM DH-002 PESO UNITARIO VARILLADO

Día	Fecha	mes	Año
lunes	16	agosto	2004

Tipo de agregado: Grava 3/4"
Procedencia: Río Arque

Muestra N° : 1 Ensayo N°: 001
Proporción: 100/0 En fecha: 16/08/2004

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
Peso Recipiente [gr]	5940	5940	5940	5940	5940		
Volumen Recipiente [cm3]	9205	9205	9205	9205	9205		
Peso Recipiente + Muestra Compactada [gr]	21440	21645	21505	21460	21500		
Peso Muestra Compactada [gr]	15500	15705	15565	15520	15560		
Peso Unitario Compactado [gr/cm3]	1,684	1,706	1,691	1,686	1,690		

1,691

Laboratorista:		Jefe Técnico
José Herbas		Ing. Edson Alcócer A.
Nombre	Firma	Nombre Firma


FORM DH-002
PESO UNITARIO SUELTO

Día	Fecha	mes	Año
lunes	16	agosto	2004

Tipo de agregado: Arena

Muestra N° : 1

Ensayo N°: 001

Procedencia: Río Arque

Proporción: 100/0

En fecha: 16/08/2004

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
Peso Recipiente [gr]	730	730	730	730	730		
Volumen Recipiente [cm3]	2320	2320	2320	2320	2320		
Peso Recipiente + Muestra Suelta [gr]	4785	4725	4730	4770	4765		
Peso Muestra Suelta [gr]	4055	3995	4000	4040	4035		
Peso Unitario Suelto [gr/cm3]	1,748	1,722	1,724	1,741	1,739		

Promedio

1,735

Laboratorista:		Jefe Técnico
José Herbas		Ing. Edson Alcócer A.
Nombre	Firma	Nombre
		Firma


FORM DH-002
PESO UNITARIO SUELTO

Día	Fecha	mes	Año
lunes	16	agosto	2004

Tipo de agregado: Grava 1 1/2"

Muestra N° : 1

Ensayo N°: 001

Procedencia: Río Arque

Proporción: 100/0

En fecha: 16/08/2004

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
Peso Recipiente [gr]	5940	5940	5940	5940	5940		
Volumen Recipiente [cm3]	9205	9205	9205	9205	9205		
Peso Recipiente + Muestra Suelta [gr]	21505	21315	21350	21285	21380		
Peso Muestra Suelta [gr]	15565	15375	15410	15345	15440		
Peso Unitario Suelto [gr/cm3]	1,691	1,670	1,674	1,667	1,677		

Promedio

1,676

Laboratorista:		Jefe Técnico
José Herbas		Ing. Edson Alcócer A.
Nombre	Firma	Nombre
		Firma


FORM DH-002
PESO UNITARIO SUELTO

Día	Fecha	mes	Año
lunes	16	agosto	2004

Tipo de agregado: Grava 3/4"

Muestra N° : 1

Ensayo N°: 001

Procedencia: Río Arque

Proporción: 100/0

En fecha: 16/08/2004

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
Peso Recipiente [gr]	5940	5940	5940	5940	5940		
Volumen Recipiente [cm3]	9205	9205	9205	9205	9205		
Peso Recipiente + Muestra Suelta [gr]	21265	21005	20960	21195	20945		
Peso Muestra Suelta [gr]	15325	15065	15020	15255	15005		
Peso Unitario Suelto [gr/cm3]	1,665	1,637	1,632	1,657	1,630		

Promedio

1,644

Laboratorista:		Jefe Técnico
José Herbas		Ing. Edson Alcócer A.
Nombre	Firma	Nombre
		Firma

Nota.- Los ensayos fueron efectuados por los Univ. Mariela Quiroz C. y Lucas Salamanca O.

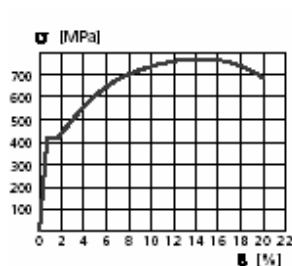
ANEXO VIII

ACEROS

- CARACTERÍSTICAS DE
DIFERENTES MARCAS DE
ACEROS
- PLANILLA DE FIERROS

A continuación se presenta la información recopilada de las distintas marcas comercializadas en nuestro medio al momento de realizar este texto. Y luego ejemplos de planillas de fierros.

ACINDAR (Argentina)



■ Propiedades mecánicas

■ [%]

• Tracción

Valores	Límite de fluencia	Resistencia a la tracción	Alargamiento porcentual
	MPa	MPa	%
Característicos	420	500	12

• Doblado y desdoblado

Las barras no presentan a simple vista fisuras, grietas o roturas transversales y oblicuas al eje de la misma, en la cara interna de la zona doblada.

• Doblado

Las barras dobladas con un ángulo de 180° sobre un mandril cuyo diámetro se indica en la siguiente tabla, no presentarán fisuras o grietas transversales en la zona traccionada.

Diámetro nominal de la barra	Diámetro del mandril para el ensayo
mm	mm
$\varnothing \leq 25$	$3,5 \times \varnothing$
$\varnothing = 32$	$5,0 \times \varnothing$
$\varnothing = 40$	$7,0 \times \varnothing$

• Masa

Diámetro nominal de la barra	Discrepancias en la masa	
	individual	lote
mm	%	%
$\varnothing < 10$	± 8	± 5
$\varnothing \geq 10$	± 5	± 3

AREQUIPA (Perú)

Barras de Construcción ASTM A615

🔍 **DENOMINACION:** BACO A615-G60.

🔍 **DESCRIPCION:** Barras de acero rectas de sección circular, con resaltes Hi-bond de alta adherencia con el concreto.

🔍 **USOS:** En la fabricación de estructuras de concreto armado en viviendas, edificios, puentes, represas, canales de irrigación, etc.

► NORMAS TECNICAS:

Composición Química, Propiedades Mecánicas y Tolerancias dimensionales: ASTM A615 Grado 60 - 96a / ITINTEC 341.031 Grado ARN420 - 91.

► PRESENTACION:

Se produce en barras de 9 m y 11.9 m de longitud en los siguientes diámetros: 6 mm, 8 mm, 3/8", 12 mm, 1/2", 5/8", 3/4", 1". La medida 1 3/8" se produce en 12m.

Previa consulta, se puede producir en otras longitudes requeridas por los clientes.

Se suministra en paquetes de 2 TM.

Las barras de 6 mm también se comercializan en rollos de 440 Kg.

► DIMENSIONES Y PESOS NOMINALES:

DIAMETRO DE BARRA		SECCION (mm ²)	PERIMETRO (mm)	PESO (kg/m)	ALTURA DE LOS RESALTES (mm - mín)
Pulg.	mm				
-	6	28	18.8	0.222	0.24
-	8	50	25.1	0.395	0.32
3/8"	8.5	71	29.9	0.560	0.38
-	12	113	37.7	0.888	0.48
1/2"	12.7	129	39.9	0.994	0.51
5/8"	15.9	199	49.9	1.552	0.71
3/4"	19.1	284	59.8	2.235	0.97
1"	25.4	510	79.8	3.973	1.27
1 3/8"	35.8	1006	112.5	7.907	1.80

► PROPIEDADES MECÁNICAS:

Límite de Fluencia (fy) = 4220 - 5710 kg/cm²

Resistencia a la Tracción (R) = 6330 kg/cm² mínimo

Relación R/fy ≥ 1,25

Alargamiento en 200 mm:

Diámetros:

6 mm, 8 mm, 3/8", 12 mm, 1/2", 5/8" y 3/4" = 9% mínimo

1" = 8% mínimo

1 3/8" = 7% mínimo

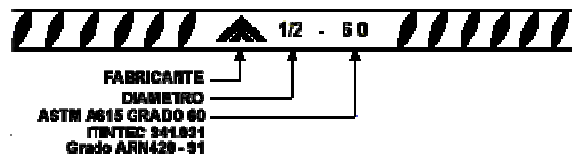
Doblado a 180° = Bueno en todos los diámetros.

Los diámetros de doblado especificados por las Normas Técnicas para la prueba de doblado son:

DIAMETRO BACO (d)	6 mm	8 mm	3/8"	12 mm	1/2"	5/8"	3/4"	1"	1 3/8"
DIAMETRO DOBLADO	3.5d	3.5d	3.5d	3.5d	3.5d	3.5d	5d	5d	7d
mm	21.0	28.0	33.3	42.0	44.5	55.6	95.5	127.0	250.6

► IDENTIFICACION:

Las barras son identificadas por marcas de laminación en alto relieve que indican el fabricante, el diámetro y el grado del acero.



BARRAS DE CONSTRUCCIÓN ASTM A706

► **DENOMINACION:** BACO A706-G60.

► **DESCRIPCION:** Barras de acero microaleado de alta ductilidad, rectas de sección circular, con resalte Hi-bond de alta adherencia con el concreto.

► **USOS:**

Se usa como refuerzo para concreto armado, en estructuras sismo-resistentes y donde se requiera el soldado de las estructuras.

El acero A706, es el único acero de construcción que cumple estrictamente con los requerimientos especificados por el American Concrete Institute, (en la Norma ACI 318-99 sección 21.2.5) para ser utilizado como refuerzo en elementos estructurales de concreto armado que resistirán fuerzas inducidas por sismos.

► **NORMAS TECNICAS:**

Composición Química, Propiedades Mecánicas y Tolerancias dimensionales: ASTM A706 Grado 60 - 96b.

► **PRESENTACION:**

Se produce en barras de 9 m de longitud en los siguientes diámetros: 5/8", 3/4", 1" y 1 3/8".

Previo acuerdo, se puede producir en otras longitudes desde 4,5 m hasta 12 m.

Se suministra en paquetes de 2 TM.

► **DIMENSIONES Y PESOS NOMINALES:**

DIAMETRO DE BARRA		SECCION (mm ²)	PERIMETRO (mm)	PESO (kg/m)
Pulg.	mm			
5/8"	15.9	199	49.9	1.552
3/4"	19.1	284	59.8	2.235
1"	25.4	510	79.8	3.973
1 3/8"	35.8	1006	112.5	7.907

► **COMPOSICION QUIMICA EN LA CUCHARA (%):**

C = 0.30 máx. Mn = 1.50 máx. Si = 0.50 máx.

P = 0.035 máx. S = 0.045 máx.

Carbono Equivalente (CE) = 0.55 máx., para garantizar soldabilidad. Es calculado con la siguiente fórmula:

$$CE = \%C + \%Mn/6 + \%Cu/40 + \%Ni/20 + \%Cr/10 - \%Mo/50 - \%V/10$$

► **PROPIEDADES MECÁNICAS:**

Límite de Fluencia (fy) = 4220 - 5480 kg/cm².

Resistencia a la Tracción (R) = 5620 kg/cm² mínimo

Relación $R/f_y \geq 1,25$

Alargamiento en 200 mm:

Diámetros:

5/8" y 3/4" = 14% mínimo

1" = 12% mínimo

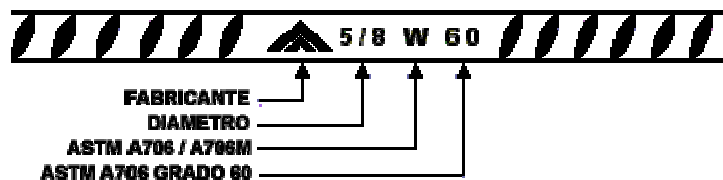
1 3/8" = Bueno en todos los diámetros.

Los diámetros de doblado especificados por las Normas Técnicas para la prueba de doblado son:

DIAMETRO BACO (d)	5/8"	3/4"	1"	1 3/8"
DIAMETRO DOBLADO	3.5d	5d	5d	7d
mm	55.6	95.5	127.0	250.6

IDENTIFICACION:

Las barras son identificadas por marcas de laminación en alto relieve que indican el fabricante, el diámetro, la norma y el grado del acero. Se le reconoce por la letra "W".



BELGO (Brasil)

Belgo50

El Belgo 50 se comercializa en barras rectas con 12 m de largo en racimos atados de 1000 kg y 2500 kg y en rodillos de 2000 kgs en los calibres hasta 16,0 mm, suministrándose también en barras dobladas.

Otras formas de acondicionamiento y largos especiales pueden ofrecerse bajo consulta.

El Belgo 50 se usa en obras de cualquier envergadura en la confección de columnas, vigas y lajas. Se fabrica dentro de las más altas exigencias de calidad, atendiendo a todas las especificaciones de la norma NBR 7480, garantizando al usuario beneficios de seguridad y de aplicación racional del producto. Belgo suministra el producto Belgo 50 soldable en todos los calibres, permitiendo eliminar pérdidas por traspase o por puntas.

Propiedades mecánicas

Exigibles de barras de acero destinadas a blindajes de hormigón armado, de conformidad con la Norma brasileña NBR 7480.

Propiedades Mecánicas del Belgo 50					
Ensayo de Arrastre (valores mínimos)			Ensayo de Dobrado a 180°		Adherencia
Resistencia característica de escurrimiento f_y (MPa)	Límite de resistencia f_{st} (MPa)	Alargamiento en 10 ϕ . (%)	Diámetro del tornillo (mm)		Coeficiente de formación superficial mínima para $\phi \geq 10$ mm 7
			$\phi < 20$	$\phi \geq 20$	
500	1,10 f_y	8	4 ϕ	6 ϕ	1.5

Diámetro Ø de los Tornillos de Doblado

Calibre	Diámetro (D) de los Tornillos de Doblado *
mm	mm
6,3	32
8,0	40
10,0	50
12,5	63
16,0	80
20,0	160
25,0	200
32,0	256

* Conforme norma ABNT 6118

Características de Masa y Sección

Calibre	Masa Nominal	Tolerancia	Sección Nominal
mm	kg/m	%	mm ²
6,3	0,245	± 10	31,2
8,0	0,395	± 10	50,3
10,0	0,617	± 6	78,5
12,5	0,963	± 6	122,7
16,0	1,578	± 6	201,1
20,0	2,466	± 6	314,2
25,0	3,853	± 6	490,9
32,0	6,313	± 6	804,2

Belgo60

El Belgo 60 Nervurado se produce en acero de bajo tenor de carbono y, consecuentemente, ofrece óptimas condiciones de soldadura.

Principales Ventajas

- Marca Belgo 60 y calibres grabados sobre el producto*, lo que garantiza la calidad Belgo
- Mayor adherencia del acero al concreto
- Mejor fijación en las estructuras
- Mejor combate al agrietamiento del concreto

* Excepto calibres $\geq 6,00$ mm

El Belgo 60 Nervurado se ofrece en rodillos que pesan 150 a 180 kg, en racimos de barras rectas de 1.000 kg y 2.500 kg, y en racimos de barras dobladas de 1.000 kg con subracimos de 250 kg. Podemos ofrecer otras formas de acondicionamiento y largos especiales, bajo consulta. El Belgo 60 se fabrica de conformidad con el CA 60 de la Norma Brasileña NBR 7480/1996.

Propiedades mecánicas

Exigibles de barras de acero, destinadas a blindajes para hormigón armado, de conformidad con la norma brasileña NBR 7480.

Propiedades Mecánicas del Belgo 60					
Ensayo de Arrastre (valores mínimos)			Ensayo de Doblado a 180°		Adherencia
Resistencia característica de escurrimiento f_y (MPa)	Límite de Resistencia f_{st} (MPa)	Alargamiento en 10 Ø. (%)	Diámetro del tornillo (mm)		Coeficiente de conformación superficial mínimo para Ø 10 mm η
			Ø < 20	Ø ≥ 20	
600	1,05 f_y	5	5Ø	-	1.5

Calibre	Diámetro (D) de los Tornillos de Doblado *
mm	mm
4,2	25
5,0	30
** 6,0	36
** 7,0	42
** 8,0	48
** 9,5	57

* Aplicación en obra conforme norma ABNT NBR 6118.

** Calibres no nervurados.

Calibre	Masa Nominal	Tolerancia	Sección Nominal
mm	kg/m	%	mm ²
4,2	0,109	± 6	13,9
5,0	0,154	± 6	19,6
** 6,0	0,222	± 6	28,3
** 7,0	0,302	± 6	38,5
** 8,0	0,395	± 6	50,3
** 9,5	0,558	± 6	70,9

** Calibres no nervurados.

Belgo 50S (soldable)

El producto Belgo 50-S tiene un proceso de fabricación distinto al usado para el Belgo 50 normal.

Una vez terminado el último pase de laminación, la barra de acero se enfría con agua a alta presión, utilizando un proceso controlado. Esto reduce la temperatura superficial de la barra, generando una capa refrigerada endurecida.

El núcleo de la barra, que permanece caliente, calienta la capa endurecida promoviendo su revenimiento y haciéndolo más dúctil. El producto final es el Belgo 50 Soldable, con una capa superficial que presenta alta resistencia al escurrimiento y un núcleo de alta ductilidad, cuyo producto presenta una capacidad de soldado bastante superior al CA 50 normal, eliminando, por ende, en la operación de soldadura, el pre-calentamiento y el control en el enfriamiento.

Calibre	Diámetro (D) de los Tornillos de Doblado **
mm	mm
6,3*	32
8,0*	40
10,0*	50
12,5	63
16,0	80
20,0	160
25,0	200
32,0	256

* Suministrado bajo consulta. ** Conforme norma ABNT NBR 6118.

Calibre	Masa Nominal	Tolerancia	Sección Nominal
mm	kg/m	%	mm ²
6,3*	0,245	± 10	31,2
8,0*	0,395	± 10	50,3
10,0*	0,617	± 6	78,5
12,5	0,963	± 6	122,7
16,0	1,578	± 6	201,1
20,0	2,466	± 6	314,2
25,0	3,853	± 6	490,9
32,0	6,313	± 6	804,2

* Suministrado bajo consulta

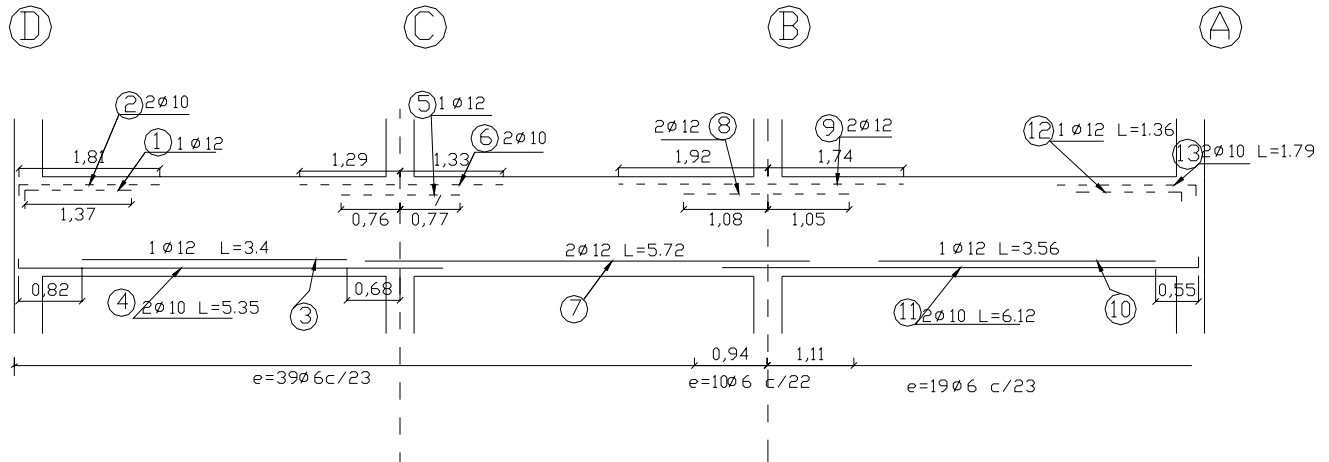
PLANILLAS DE FIERROS

VIGA

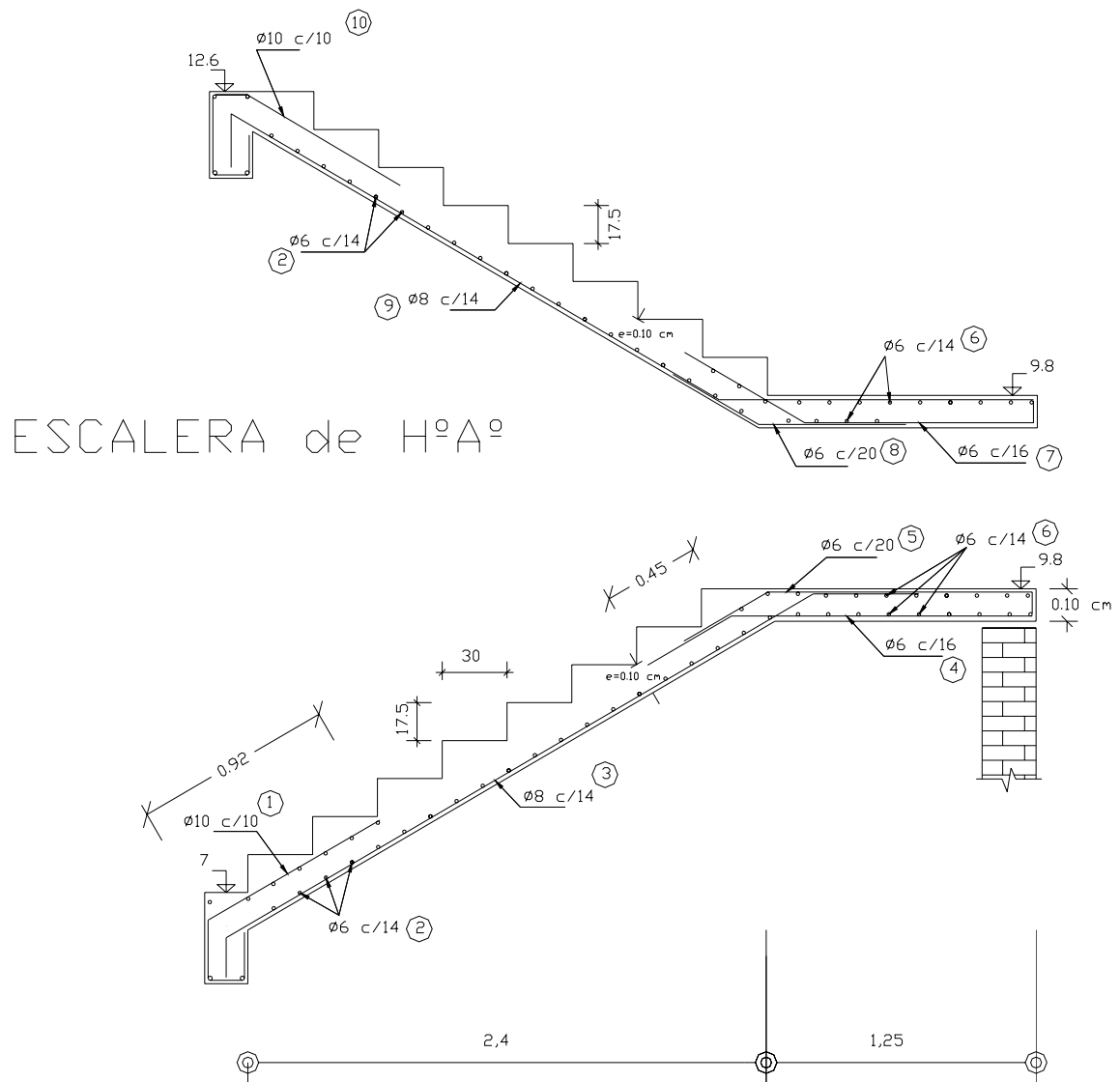
Portico 5

Viga Superior 25/50

Esc. 1:75



POS	ESQUEMA	A	B	C	D	E	F	φ	Nº DE Fe	LONG. TOT	PESO LINEAL	PESO TOTAL
1		0,14	1,37					12	1	1,51	0,89	1,34
2		0,12	1,81					10	2	3,86	0,62	2,39
3		3,40						12	1	3,4	0,89	3,03
4		0,14	5,46					10	2	11,2	0,62	6,94
5		1,53						12	1	1,53	0,89	1,36
6		2,62						10	2	5,24	0,62	3,25
7		5,72						12	2	11,44	0,89	10,18
8		2,13						12	2	4,26	0,89	3,79
9		3,66						12	2	7,32	0,89	6,51
10		3,56						12	1	3,56	0,89	3,17
11		6,12	0,12					10	2	12,48	0,62	7,74
12		1,36	0,14					12	1	1,5	0,89	1,34
13		1,79	0,12					10	2	3,82	0,62	2,37
		0,03	0,46	0,21	0,46	0,21	0,03	6	72	100,8	0,22	22,18
Suma Tot (Kg)												75,59
Vol Hº(m³)												1,681
Cuantia Kg / m³												44,96



POS	ESQUEMA	A	B	C	D	E	F	(Nº DE Fe	LONG. TOT	PESO LINEAL	PESO TOTAL
1		0,21	0,21	0,3	0,92			10	13	21,32	0,62	13,22
2		1,30						6	40	52	0,22	11,44
3		0,18	3,14	0,48				8	10	38	0,4	15,20
4		0,45	1,39					6	9	16,56	0,22	3,64
5		0,45	1,22	0,05				6	7	12,04	0,22	2,65
6		3,00						6	2	6	0,22	1,32
7		0,60	1,05	0,05				6	9	15,3	0,22	3,37
8		0,45	0,45					6	7	6,3	0,22	1,39
9		0,25	2,6	1,45				8	10	43	0,4	17,20
10		0,10	0,21	0,41	0,21	0,82		10	13	22,75	0,62	14,11
Suma Tot (Kg)												83,53
Vol Hº(m³)												1,40
Cuantía Kg / m³												59,66

ANEXO IX

ANÁLISIS DE AGUAS



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
CENTRO DE AGUAS Y SANEAMIENTO AMBIENTAL

LABORATORIO REGIONAL DE CONTROL DE CALIDAD DE AGUAS
LABORATORIO PILOTO A NIVEL NACIONAL
REPORTE DE ANALISIS DE AGUAS

NUMERO DE REGISTRO: 8915-SC-7812
 NUMERO DE MUESTRA: 728/01

PRESTATARIO : GRUPO 9

DATOS DE LA MUESTRA:

DEPARTAMENTO : COCHABAMBA
 PROVINCIA : CAERCADO
 LOCALIDAD : COLQUIRI
 TIPO DE FUENTE : SUBTERRANEA (POZO 40 m.)
 PUNTO DE MUESTREO : GRIFO PATIO
 PRESERVADA : SI
 TIPO DE ANALISIS : HORMIGON

REUNE LAS CONDICIONES DE TOMA Y PRESERVACION DE MUESTRAS

FECHA DE MUESTREO : 21/05/01

HORA DE MUESTREO : 11:00

RESULTADOS

ANALISIS FISICOQUIMICO

PARAMETRO	METODO	UNIDADES	
pH	ELECTROQUIMICO		7.29
CONDUCTIVIDAD	ELECTROQUIMICO	µmho/cm	186.50

PARAMETRO	METODO	UNIDADES	CONCENTRACION
SOLIDOS TOTALES	Calcinación 180°C	mg/L	127.00
SOLIDOS FILTRABLES	Calcinación 180°C	mg/L	117.00
SOLIDOS SUSPENDIDOS	Cálculo	mg/L	10.00
ALCALINIDAD	Potenciométrico	mgCaCO ₃ /L	98.12
BICARBONATOS	Cálculo	mgCaCO ₃ /L	98.12
CARBONATOS	Cálculo	mgCaCO ₃ /L	0.00
CLORUROS	Argentométrico	mgCl ⁻ /L	3.06
SULFATOS	Turbidimétrico	mgSO ₄ ⁻ /L	3.00

ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

El agua analizada es apta para el uso en el amasado del hormigón

Cochabamba, 23 de mayo del 2001

Jeannette Verduguez Q.
 Qmc. Jeannette Verduguez Q..
 RESPONSABLE L.R..C.C.A.

Virginia Rodríguez R.
 Lic. Virginia Rodríguez R.
 DIRECTORA CENTRO DE AGUAS
 Y SANEAMIENTO AMBIENTAL



ANEXO X

DOSIFICACIÓN
(ver CD Adjunto)