

## TABLA DE CONTENIDO

<b>DRENAJE SUPERFICIAL SOBRE CARRETERAS .....</b>	<b>159</b>
<b>(ALCANTARILLAS) .....</b>	<b>159</b>
8.1 INTRODUCCION.....	159
8.2 ESTUDIOS PREVIOS AL DISEÑO DE ALCANTARILLAS .....	159
8.2.1 Estudios Hidrológicos.....	160
8.2.2 Estudios Topográficos. ....	162
8.2.3 Estudios Hidráulicos.....	163
8.3 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO EN LAS ALCANTARILLAS. ....	163
8.4 HIDRÁULICA DE LAS ALCANTARILLAS. ....	166
8.5 DISEÑO DE LAS ALCANTARILLAS.....	170
8.6 DISEÑO HIDRAULICO DE LAS ALCANTARILLAS. ....	175
8.7 EJERCICIOS DE APLICACIÓN. ....	178
8.8 APLICACIÓN DE PROGRAMAS EN EL DISEÑO DE ALCANTARILLAS.....	182
8.8.1 Aplicaciones para el cálculo de caudal de diseño. ....	183
8.8.2 Diseño de alcantarillas con CALCANT.....	184
8.9 EJERCICIOS PROPUESTOS.....	186
8.10 BIBLIOGRAFIA.....	186

## **CAPITULO 8**

### **DRENAJE SUPERFICIAL SOBRE CARRETERAS (ALCANTARILAS)**

#### **8.1 INTRODUCCION.**

La lluvia que cae sobre la superficie de la tierra, una parte escurre inmediatamente reuniéndose en corrientes de agua; otra se evapora y el resto se infiltra en el terreno. Cuando el agua de escurrimiento o de infiltración alcanza la carretera, si no se dispone de los elementos necesarios para conducirla o desviarla, puede ocasionar la inundación de la calzada, el debilitamiento de la estructura de la carretera y la erosión o el derrumbe de los taludes, con graves perjuicios para el usuario de la vía y para la economía de la nación.

La remoción de las aguas superficiales, ya sea que éstas caigan directamente sobre la plataforma de la vía o sobre las cuencas tributarias de las corrientes que debe cruzar la carretera, se logra a través de las obras de drenaje superficial; la remoción de las aguas subterráneas, mediante los subdrenajes.

Numerosos factores deben hacerse intervenir en el estudio de los drenajes de una carretera: la Topografía, la Hidrología y la Geología de la zona; variadas ramas de la ingeniería participan en la solución del problema: la estadística, la hidráulica, el diseño estructural, etc.

Debido a las diferencias en las características topográficas, hidrológicas y geológicas, los métodos de diseño de los drenajes y los coeficientes que se utilizan en las fórmulas pueden variar mucho de un sitio a otro. Ello obliga, en este texto, a una exposición de carácter fundamental, donde se señalen las prácticas de mayor aceptación. La función de los drenajes superficiales de una carretera es la de proveer las facilidades necesarias para el paso de aguas de un lado a otro de la vía, y para el drenaje de las aguas que caen directamente encima de la plataforma y de otras áreas que desagüen en ella.

En el orden enunciado, esta función es cumplida por las alcantarillas, los puentes, por las zanjas, cunetas y desagües pluviales. Una alcantarilla es un conducto que lleva agua a través de un terraplén. Es un paso a nivel para el agua y el tráfico que pasa sobre ella. A diferencia con la plataforma de los puentes, la parte superior de las alcantarillas, generalmente no forma parte del pavimento de la carretera.

#### **8.2 ESTUDIOS PREVIOS AL DISEÑO DE ALCANTARILLAS**

Los estudios previos al diseño de las alcantarillas se pueden dividir en los siguientes grupos:

1. Estudios Hidrológicos.
2. Estudios Topográficos.
3. Estudios Hidráulicos.

### 8.2.1 Estudios Hidrológicos.

Como se vio en el capítulo 1, el ciclo hidrológico es un acontecimiento importante en el diseño de sistemas de drenaje vial, ya que de este nos importan dos fases importantes que son: la Precipitación y el escurrimiento. Los principios de hidrología relacionados con el estudio del drenaje de la carretera son aplicables al diseño de alcantarillas, siempre que se disponga de datos suficientes. Es probable, sin embargo, que la información de precipitación y escurrimiento para las corrientes que se tratan de evacuar a través de las alcantarillas no sea obtenible, y que sea necesario utilizar datos deducidos de la observación del comportamiento de estructuras similares en la región. También es posible hacer predicciones del escurrimiento para áreas locales no medidas, a partir de los registros de áreas similares para las cuales el escurrimiento haya sido medido.

En el análisis hidrológico para una estructura de drenaje, debe ser reconocido que hay muchos factores variables que afectan las estructuras. Algunos de los factores que necesitan ser reconocidos y ser considerados son por ejemplo: precipitación, tamaño, forma, y orientación del área del drenaje, Cubierta de tierra, Tipo de suelo, pendientes del terreno. Existen varios métodos hidrológicos para el cálculo del escurrimiento superficial, entonces el método que se utilice debe ser el que de menor error para las condiciones del lugar de obra. Al diseñar una estructura de drenaje, uno de los primeros pasos a dar consiste en estimar el volumen de agua que llegará a ella en un determinado instante. Dicho volumen de agua se llama descarga de diseño, y su determinación debe realizarse con el mayor grado de precisión, a fin de poder fijar económicamente el tamaño de la estructura requerida y disponer del agua de escurrimiento sin que ocurran daños a la carretera.

La utilización de fórmulas, ya sea que den la descarga de diseño o directamente la abertura, puede resultar atractiva por su simplicidad; sin embargo, la ignorancia de las circunstancias que condicionaron su desarrollo puede conducir a graves errores. Cada una de las innumerables fórmulas que se emplean tiene su propósito particular y ninguna es de aplicación general.

Entre las fórmulas que dan la descarga de diseño, una que se destaca es la formula RACIONAL, por ser la de uso más extendido.

#### a.) La Fórmula Racional

Fue desarrollada originalmente para estimar el escurrimiento en áreas urbanas. El uso de esta fórmula se remonta a 1889, cuando Emil Kuichling la menciona por primera vez. El método racional se puede considerar para las áreas hasta 500 hectáreas.<sup>1</sup>

La fórmula racional expresa que la descarga es igual a un porcentaje de la precipitación multiplicado por el área de la cuenca. La duración mínima de la lluvia seleccionada deberá ser el tiempo necesario, en minutos, para que una gota de agua llegue a la estructura de drenaje desde el punto más alejado de la cuenca. Ese tiempo se llama tiempo de concentración:

Así puede escribirse:  $Q = C_f CIA$  (8-1)

---

<sup>1</sup> Diseño de carreteras, Carciente, Cáp. 7

Donde:

Q: Descarga en litros por segundo.

$C_f$ : Factor de saturación<sup>2</sup>

C: Coeficiente de escorrentía.

I: Intensidad de la precipitación correspondiente al tiempo, de concentración, en litros por segundo por hectárea,

A: área de la cuenca en hectáreas.

Para las unidades americanas se tiene:  $Q \text{ (Ft}^3\text{/seg.)} = (-) * (-) * (\text{in/Hr.}) * (\text{Acre})$

El coeficiente de factor de saturación es un factor que se toma en cuenta respecto a la frecuencia de retorno de un evento máximo (avenidas) y se da de acuerdo a la siguiente tabla:

Frecuencia de Retorno (años)	$C_f$
2, 5, 10	1.0
25	1.1
50	1.2
100	1.25

**Nota: el valor  $C_f * C$  debe ser menor o igual a 1.0<sup>2</sup>**

**Tabla 8.1  $C_f$  coeficiente de saturación**

El periodo de retorno es un factor que influye en el diseño de alcantarillas ya que puede variar de 5 a 100 años de acuerdo a la importancia de la vía que se tiene, o del lugar donde se necesite la alcantarilla y de acuerdo a la economía para el diseño, estas frecuencias se dan en la siguiente tabla:

Tipo de Obra de drenaje	Frecuencia de Diseño			
	Autopistas		Carreteras	
	Urbanas	Rurales	Tipo A y B	Tipo C y D
Pontones	50	50	50	25
Alcantarillas de Sección Transversal mayor de 4m <sup>2</sup>	50	25	25	10
Alcantarillas de Sección Transversal menor de 4m <sup>2</sup>	25	25	15	10

**Tabla 8.2 Frecuencia de Diseño para pontones y alcantarillas.**

La formula racional de Krimgold, esta basada en ciertas hipótesis, estas son:

1. El escurrimiento resultante de cualquier intensidad de lluvia es un máximo cuando esa intensidad de lluvia dura, al menos, tanto como el tiempo de concentración.
2. El escurrimiento resultante de una intensidad de lluvia, con duración igual o mayor que el tiempo de concentración, es una fracción de la precipitación.

<sup>2</sup> coeficiente, Manual de VDOT.

3. La frecuencia de la máxima descarga es la misma que la de la intensidad de lluvia para el tiempo de concentración dado.
4. La relación entre máxima descarga y tamaño del área de drenaje es la misma que la relación entre duración e intensidad de precipitación.
5. El coeficiente de escorrentía es el mismo para lluvias de diversas frecuencias.
6. El coeficiente de escorrentía es el mismo para todas las lluvias en una cuenca dada.

El método racional no toma en cuenta el efecto de almacenamiento de la cuenca, pues supone que la descarga es igual a la precipitación pluvial menos toda la retención de la cuenca. Tampoco considera variaciones de intensidad de lluvia en el área durante todo el tiempo de concentración. Estas suposiciones hacen particularmente susceptible de errores los cálculos, cuando el área de drenaje es grande.

La aplicación de la formula Racional requiere el conocimiento de un coeficiente de escorrentía que depende de las características que rigen la cantidad y velocidad del escurrimiento en la cuenca. Estos valores se dan en el Anexo de este capítulo (Fig.8.15 a 8.16), para diferentes tipos de zonas y superficies.

Una de las hipótesis básicas de la formula racional es la de suponer que la lluvia será de suficiente duración, para permitir la llegada simultanea del agua que cae sobre toda la superficie de la cuenca a la boca de la estructura de drenaje. Ese tiempo se ha denominado Tiempo de concentración y es el requerido para que el agua que cae en el punto mas alejado de la cuenca llegue al punto de salida.

Si la lluvia es de mayor duración que el tiempo de concentración,  $T_c$ , el escurrimiento será menor que el calculado para dicho tiempo, debido a que la intensidad de esta lluvia será menor que la duración  $T_c$ . Si la lluvia que cae es de menor duración que  $T_c$ , también la descarga será menor, debido a que no toda la cuenca contribuye simultáneamente al escurrimiento.

Para hallar este valor existen varias formulas empíricas entre ellas el Manual de Drenajes MOP. Sugiere la siguiente:

$$T_c = 0.0195 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (8-2)$$

$T_c$ : Tiempo de concentración, minutos.

$L$ : Longitud del cauce principal, metros.

$H$ : Diferencia de elevación, metros.

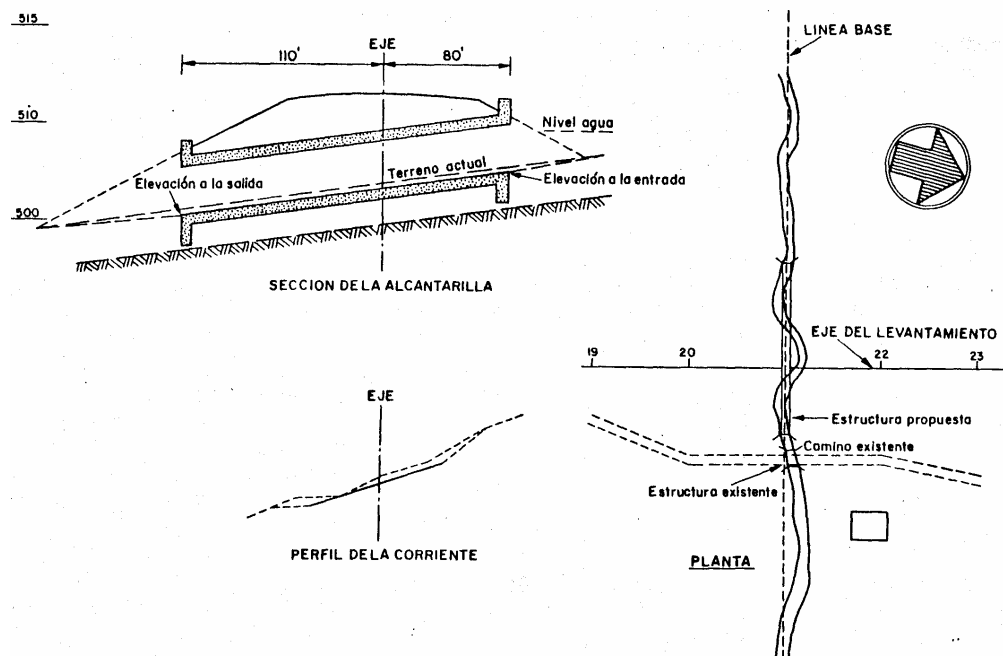
### 8.2.2 Estudios Topográficos.

La selección del tamaño y tipo de estructura de drenaje, aceptable a un sitio determinado, depende grandemente de la precisión con que se puedan señalar sobre los planos topográficos o sobre fotografías aéreas de los alrededores de la carretera, las cuencas de los arroyos y corrientes de agua que cruzan la vía, el perfil longitudinal del canal a la entrada y salida de la alcantarilla y su sección transversal, la sección transversal del terraplén, las cotas de inundación permisibles a la entrada y salida de la estructura, la naturaleza del lecho del canal, las posibilidades de erosión, etc.

En la Figura 8.1 se muestra un modelo de levantamiento topográfico donde se indican los datos fundamentales a anotar.

### 8.2.3 Estudios Hidráulicos.

La finalidad del diseño hidráulico de las alcantarillas es encontrar el tipo y tamaño de las mismas que desagüen de la manera más económica la corriente originada por una lluvia de frecuencia establecida.

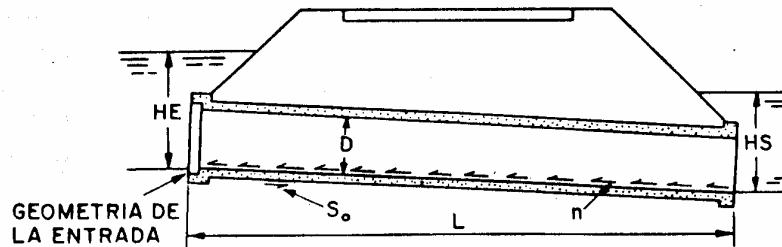


**Figura 8.1 Levantamiento topográfico para el emplazamiento de una alcantarilla.**

Generalmente, la alcantarilla reduce el cauce de corriente, ocasionando un represamiento del agua a su entrada y un aumento de su velocidad dentro del conducto y a la salida. El éxito del diseño hidráulico radica, por consiguiente, en proveer una estructura con capacidad de descargar, económicamente, una cierta cantidad de agua dentro de límites establecidos de elevación del nivel de las aguas y de velocidad. Cuando la altura y la descarga han sido determinadas, la finalidad del diseño es proporcionar la alcantarilla más económica, la cual será la que con la menor sección transversal satisfaga los requerimientos del diseño.

### 8.3 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO EN LAS ALCANTARILLAS.

El proyectista de las alcantarillas de una carretera precisa conocer la mecánica básica del flujo en el conducto, pues ella permite establecer las ecuaciones que relacionan la altura de agua a la entrada con el gasto y las dimensiones de la alcantarilla.

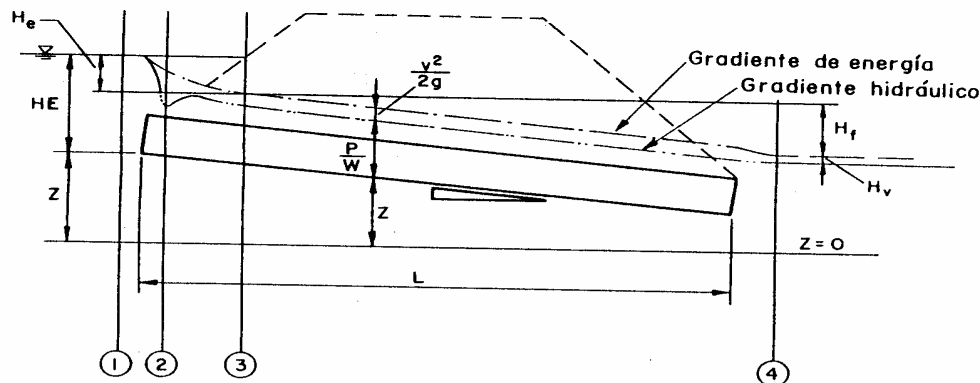


**Figura 8.2 Factores que regulan el escurrimiento a través de una alcantarilla**

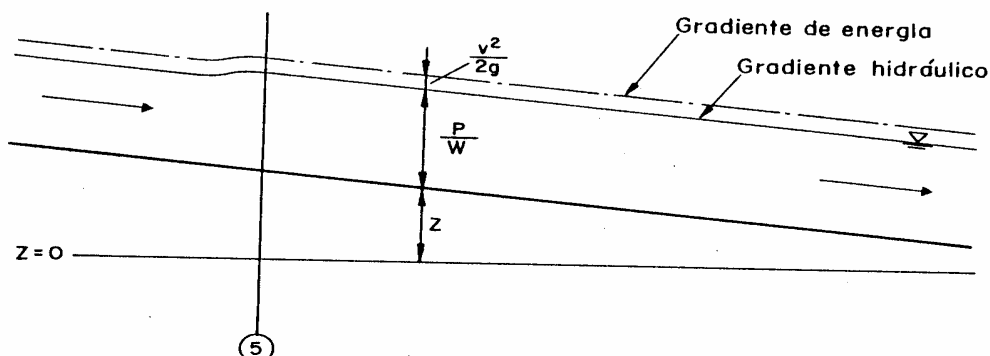
El escurrimiento a través de una alcantarilla generalmente queda regulado por los siguientes factores: pendiente del lecho de la corriente aguas arriba y aguas abajo del lugar, pendiente del fondo de la alcantarilla, altura de embalse permitida a la entrada, tipo de entrada, rugosidad de las paredes de la alcantarilla, y altura del remanso a la salida. Todos estos factores se combinan para determinar las características del flujo a través de la alcantarilla.

En la Figura 8.3 se compara el flujo por un canal abierto y a través de un conducto cerrado.

El *gradiente de energía*, también llamado línea de carga total, es la suma de la carga por velocidad,  $v^2/2g$ , la profundidad del flujo o la altura piezométrica, según se trate de un canal o de un conducto cerrado, y la elevación sobre un datum arbitrario,  $Z$ .



**FLUJO A TRAVES DE UN CANAL CERRADO**



**Figura 8.3 Comportamiento del flujo a través de un canal cerrado y de un conducto abierto.**

La línea del gradiente de energía baja en el sentido del flujo, siendo su pendiente igual a la relación  $H_L/L$ , donde  $H_L$  es la pérdida total de carga en la distancia  $L$ .

El *gradiente hidráulico* o línea de carga piezométrica es la suma de la elevación  $Z$  del fondo del conducto sobre un plano de referencia más la altura de agua o la altura piezométrica, según corresponda.

Obsérvese en la Figura 8.3 que en los canales abiertos, el término  $p/w$  es equivalente a la profundidad del flujo y, por consiguiente, la línea del gradiente hidráulico coincide con el nivel de la superficie del agua. En los conductos cerrados que trabajan a presión,  $p/w$  es la altura piezométrica, y la línea del gradiente hidráulico está por encima de la cara superior del conducto en tanto que la relación entre la presión interna y la presión atmosférica sea positiva.

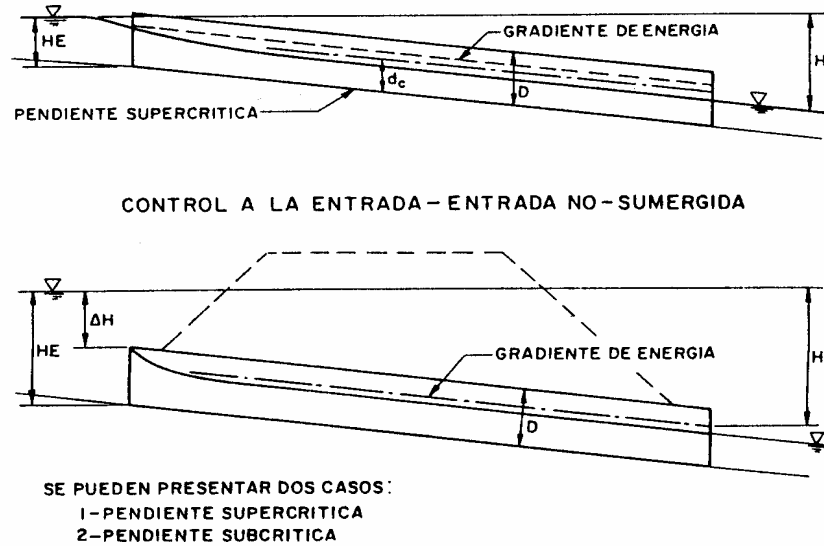
En una sección un poco antes de la entrada de la alcantarilla, como en la Sección 1 del esquema, el flujo es esencialmente uniforme y las líneas de gradiente hidráulico y de energía prácticamente son coincidentes. Al entrar el agua en la alcantarilla, Sección 2, el flujo se contrae y poco después se expande, debido a la geometría de la entrada, produciéndose una pérdida de energía en dicha sección. Al restablecerse aguas abajo una distribución normal de la velocidad, Sección 3, a lo largo del canal se ocasiona una nueva pérdida de energía debido a la fricción o resistencia de forma del conducto. En la salida, Sección 4, hay una nueva pérdida de energía causada por la turbulencia de la expansión del flujo y por el retardo que éste sufre por el agua del canal de salida. Finalmente, al fluir el agua libremente en el canal, el flujo se restablece y el gradiente hidráulico coincide con la superficie del agua, Sección 5.

Los ensayos de laboratorio y las observaciones de campo han evidenciado que existen dos tipos principales de flujo en las alcantarillas: flujo con control a la entrada y flujo con control a la salida, entendiéndose *por control* aquella sección donde existe una relación definida entre el gasto y la profundidad.

*Control a la Entrada* significa que la capacidad de la alcantarilla está regulada por la geometría de la sección (área, forma y naturaleza del contorno) y por la altura de agua a la entrada del conducto, independientemente de que ésta esté descubierta o sumergida; no siendo afectada, en cambio, por la longitud, rugosidad y condiciones de salida de la alcantarilla. La Figura 8.4 muestra flujos característicos con control a la entrada. Para esta condición de trabajo, las relaciones entre altura de agua y gasto en diferentes tipos de conductos circulares y abovedados han quedado establecidas mediante observaciones de laboratorio realizadas en modelos y verificadas en prototipos.

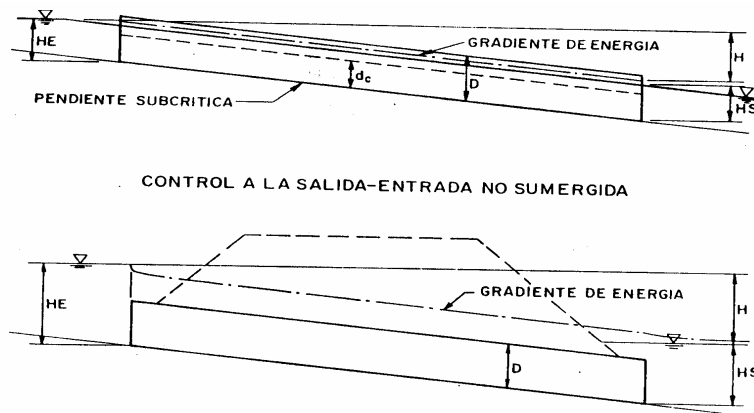
Una alcantarilla puede tener su control a la entrada cuando, trabajando con ésta descubierta, la pendiente del conducto es supercrítica. Caso más común es cuando, estando la entrada sumergida, el conducto no fluye lleno. Una alcantarilla que trabaja con control a la entrada recibe el nombre de *alcantarilla hidráulicamente corta*. Si la altura de agua a la entrada es alta, la pendiente del conducto suave y la longitud de la alcantarilla suficientemente larga, la sección de control puede cambiar de la entrada a la salida.





**Figura 8.4 Alcantarillas con control a la entrada a) No sumergida, b) sumergida.**

Al tenerse *control a la salida*, a los factores de regulación de la capacidad de la alcantarilla considerados anteriormente se añaden otros: la longitud, pendiente y rugosidad del conducto, las pérdidas de carga a la entrada y, a veces, la altura de agua a la salida. Como muestra la Figura 8.5



**Figura 8.5 Alcantarillas con control a la salida.**

El control a la salida se presenta en dos circunstancias: la menos frecuente es cuando la altura de agua no sumerge la entrada y la pendiente del conducto es subcrítica; más común es el caso de una alcantarilla fluyendo a plena capacidad. Una alcantarilla que trabaja con control a la salida recibe el nombre de *alcantarilla hidráulicamente larga*. Un resumen de las condiciones típicas de operación de las alcantarillas aparece en la Figura 8.17 (ANEXOS).

#### 8.4 HIDRÁULICA DE LAS ALCANTARILLAS.

El análisis hidráulico riguroso del comportamiento del flujo a través de las alcantarillas es un tema complejo. Un estudio sistemático del tema, emprendido por el U. S. Department of Commerce desde hace años, ha producido numerosos

informes, desde un punto de vista de aplicación, el diseño de las alcantarillas requiere no solo un conocimiento de la mecánica básica del flujo en los conductos cerrados, expresado en forma de ecuaciones que relacionen el gasto o caudal con las dimensiones de las alcantarillas, sino también un procedimiento de cálculo que simplifique la aplicación de las numerosas variables involucradas en dichas ecuaciones y permita relacionar la capacidad hidráulica del conducto con los requerimientos hidrológicos.

El estudio de los tipos de flujo a través de las alcantarillas ha permitido establecer las relaciones existentes entre la altura de agua a la entrada del conducto, el gasto y las dimensiones de la alcantarilla. Para el caso de las alcantarillas trabajando con control a la entrada, los resultados experimentales obtenidos se han vertido en forma de monogramas, tales como los de las Figuras del anexo Fig. 8.1 a 8.10.

Cuando se trata de alcantarillas que trabajan con control a la salida, para pasar una cantidad de agua a través de ellas se requiere una carga o energía  $H$  capaz de suministrar la carga de velocidad,  $H_v$ , la pérdida de carga a la entrada,  $H_e$ , y la pérdida de carga por fricción,  $H_f$ , en el conducto, es decir:

$$H = H_v + H_e + H_f. \quad (8-3)$$

La carga por velocidad es igual a  $v^2/2g$ ; la pérdida de carga a la entrada depende de la geometría de la entrada, y se expresa en función de la carga de velocidad como  $C_e \cdot v^2/2g$ ; la pérdida de carga por fricción se puede calcular mediante la ecuación de Manning:

$$H_f = \frac{19.62 \cdot n^2 \cdot L}{R^{2/3}} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (8-4)$$

Donde  $R$  y  $L$  se miden en metros,  $v$  en m/seg. y  $g$  en m/seg<sup>2</sup>. Sustituyendo estos valores en la primera ecuación, se tiene

$$H = \frac{v^2}{2g} + C_e \frac{v^2}{2g} + \frac{19.62 n^2 L}{R^{2/3}} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (8-5)$$

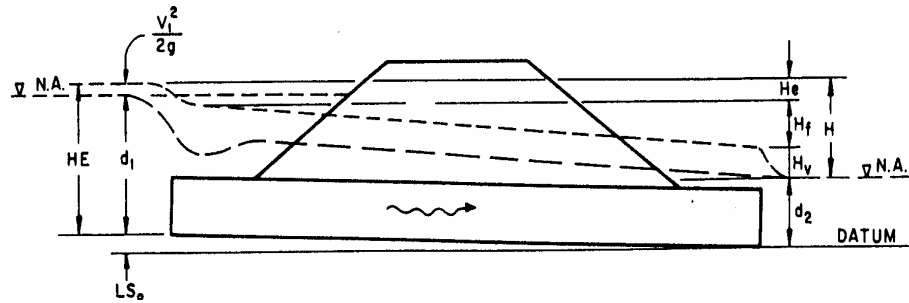
También se puede escribir como:

$$H = \frac{v^2}{2g} \cdot \left( 1 + C_e + \frac{19.62 n^2 L}{R^{2/3}} \right) \quad (8-6)$$

Ecuación que puede resolverse mediante los monogramas de las Figuras 8.5 a 8.10. (de anexos).

Pero, en las alcantarillas que tienen el control a la salida, no basta con determinar la carga utilizada. Es necesario calcular la altura de agua a la entrada,  $H_E$ , considerando la pendiente de la alcantarilla y las condiciones de la salida. En la Figura 8.6, igualando la energía total aguas arriba a la energía justo a la salida de la alcantarilla, se obtiene:

$$H = d_1 + \frac{v_1^2}{2g} + LS_o - d_2 = H_v + H_e + H_f \quad (8-7)$$



**Figura 8.6 Energía a la entrada y salida de la alcantarilla.**

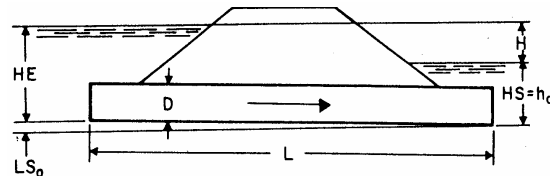
Si, antes de la entrada al conducto, la carga por velocidad es pequeña, su valor puede despreciarse, el nivel de la superficie del agua y la línea del gradiente de energía coinciden, y la altura de agua a la entrada será

$$HE = H + d_2 - L \cdot So \quad (8-8)$$

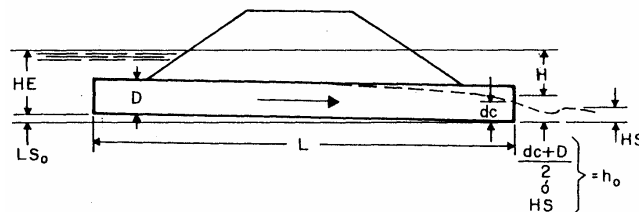
El valor de  $H$  debe medirse desde cierto plano a la salida. La elevación o cota de este plano depende del gasto o de la altura de agua a la salida. Para simplificar los cálculos, se designa como  $h_o$  a la distancia entre el fondo del conducto a la salida y este plano. De esta manera, la ecuación anterior se escribe bajo la forma:

$$HE = H + h_o - L \cdot So \quad (8-9)$$

Para alcantarillas que fluyen llenas,  $h_o$  es igual a la altura del conducto o a la altura de agua a la salida, eligiéndose el valor que resulte mayor (Fig. 8.7). Para alcantarillas que fluyen parcialmente llenas,  $h$  es igual a  $(d + D)/2$  o a la altura del agua a la salida, tomándose aquí también el valor que sea mayor (Fig. 8.8).



**Figura 8.7 Alcantarilla a Flujo Llento.**



**Figura 8.8 Alcantarilla a flujo parcialmente llento**

Como se observa en los nomogramas de los anexos (8.1 a 8.8), cualquiera que sea el control del flujo de la alcantarilla, un factor importante en la capacidad del conducto es la forma de la entrada. Una entrada adecuada incrementa la eficacia hidráulica mediante la reducción de la contracción del flujo a la entrada, sirve de protección a los terraplenes de las vías y reduce la sedimentación dentro del conducto.

Cuando la altura de agua a la entrada no es determinante en el diseño de una alcantarilla, la selección del tipo de entrada no reviste mayor importancia; pero cuando dicha altura está limitada o cuando la erosión o sedimentación pueden constituir un problema, la selección de una entrada adecuada es fundamental. Otras veces, una alcantarilla puede haber sido diseñada con el propósito de restringir el flujo aguas abajo, requiriéndose para ello la formación de un embalse aguas arriba. En estos casos, el tipo de entrada juega un papel importante en la obtención de los resultados deseados.

Los distintos tipos de entrada se evalúan a través de un coeficiente de entrada,  $C_e$ . El menor valor de este coeficiente indica una mayor eficiencia de la entrada. De una manera general, las entradas pueden clasificarse en tres grupos:

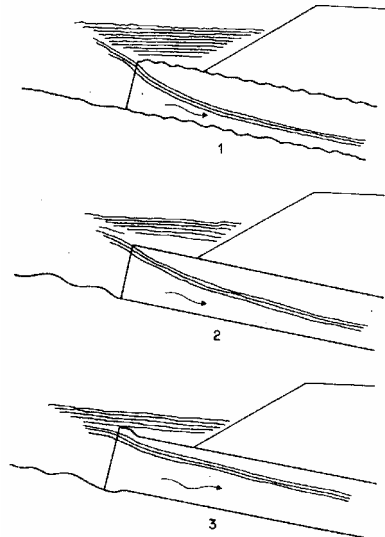
1. Entradas salientes o proyectantes.
2. Entradas con cabezal y aletas.
3. Entradas mejoradas de diseño especial.

La capacidad y adaptabilidad de las *entradas proyectantes* varían grandemente según el tipo de conducto. La principal ventaja de este tipo de entrada es su bajo costo, aunque a veces son objetadas debido a su susceptibilidad durante las operaciones normales de mantenimiento de los taludes y calzada y por razones de seguridad vial.

En tubos de concreto, las entradas de espiga y campana o las tomas con lengüeta y ranura son altamente eficientes, con un coeficiente de entrada de 0,25. Las espigas con los bordes romos tienen un coeficiente de entrada de 0,5.

En tubos de metal corrugado, la entrada proyectante ofrece gran resistencia al flujo; su coeficiente de entrada es 0,9.

Estos tipos de entrada están ilustrados en la Figura 8.9.



**Figura 8.9. Tipos de contracción del flujo a la entrada de alcantarillas convencionales. 1) Tubo de metal corrugado- extremo saliente, 2) T. concreto- espiga con bordes romos, 3) T. de concreto- entrada acampanada.**

El comportamiento de cada una de ellas está relacionado con la contracción del flujo: una mayor contracción requiere una mayor carga para hacer pasar un gasto dado a través del conducto.

Los *cabezales* son estructuras que se colocan en los extremos de las alcantarillas por una diversidad de razones: para aumentar la eficiencia de la entrada, contribuir a la estabilidad del talud de relleno y protegerlo contra la erosión. La eficiencia de las entradas con cabezal también depende del tipo de material de la alcantarilla. Un conducto de metal corrugado con cabezal se comporta similarmente a un borde romo, con un coeficiente de entrada de 0,4. En ellos, las pérdidas por entrada pueden reducirse redondeando la entrada. De esta manera, se ha logrado rebajar el coeficiente a 0.15 cuando el radio de redondeo es 0.5 veces el diámetro del conducto y a 0.10 con un radio de 0.25 veces el diámetro.

En los tubos de concreto, no se consigue ningún mejoramiento de la eficiencia hidráulica colocando cabezales en terminales de lengüeta y ranura o en tomas acampanadas. Los coeficientes de entrada en cada caso son 0,2 y 0,4. Muy frecuentemente los cabezales son prolongados por medio de otras estructuras conocidas con el nombre de aletas. Estas encuentran su mejor aplicación cuando los taludes del cauce de entrada son inestables o cuando la alcantarilla esta en posición enrijada en relación al cauce. En la Figura 8.19 (anexo del capítulo), se indican casos que requieren el empleo de aletas.

La tabla 8.20 (anexo del capítulo), se resume los coeficientes de entrada para distintas disposiciones de las tomas.

Los avances hacen que se pruebe el uso de otros tipos de entradas que mejoren hidráulicamente las alcantarillas, tanto en entradas como en salidas de alcantarillas, estas obras disminuyen la necesidad de mantenimiento, contribuyen a asegurar la estabilidad del terraplén y a reducir erosión alrededor de la entrada.<sup>3</sup>

## 8.5 DISEÑO DE LAS ALCANTARILLAS.

El diseño de una alcantarilla, cuando se realiza integralmente, es un proceso que abarca no solamente el diseño hidráulico del conducto sino que se refiere a las condiciones de ubicación, alineamiento y pendiente que tendrá la estructura, a la selección del tipo, forma del conducto y de sus instalaciones accesorias, al estudio de los posibles daños que puede ocasionar la erosión producida por las aguas y a su remedio, a las condiciones de instalación del conducto y al cálculo estructural bajo las cargas externas a que estará sometido, a la prevención de los daños derivados de la corrosión, al análisis de la obra desde los puntos de vista de la seguridad y de la estética vial y a la justificación económica del diseño que se haya propuesto. Como los sistemas de drenaje inciden sobre el costo de conservación y mantenimiento de las carreteras, también es necesario, que las alcantarillas sean diseñadas considerando que su funcionamiento deberá estar acorde con las limitaciones impuestas por los sistemas y métodos de mantenimiento.

### a) Emplazamiento de las alcantarillas

Existen tres factores importantes que deben tomarse en cuenta en la localización de una estructura de drenaje para lograr el mayor grado de eficiencia y seguridad; estos factores son: alineamiento, pendiente y elevación.

<sup>3</sup> Referencia Carciente Manual de Carreteras Pág. 7

El *alineamiento* más adecuado se logra cuando la estructura se adapta a las condiciones topográficas del lugar; esto significa que el eje de la alcantarilla deberá coincidir con el lecho de la corriente, evitando cambios bruscos que impidan o retarden el flujo normal. Se puede lograr un alineamiento recto cambiando la dirección del cauce, alineando la alcantarilla oblicuamente con respecto al eje original de la vía, o combinando ambos métodos.

Se justifica un cambio de dirección en el cauce cuando el costo de esto sea compensado por una disminución en la longitud o diámetro de la alcantarilla; un alineamiento oblicuo aumenta la longitud de la alcantarilla, si bien aumenta en eficiencia hidráulica. Cuando es indispensable un cambio brusco de dirección en el alineamiento horizontal, éste debe realizarse mediante curvas tan amplias como sea posible, evitando que los extremos de la alcantarilla se encuentren cerca del lugar donde la corriente cambia de curso.

Un factor que afecta directamente la ubicación de las alcantarillas es la capacidad de soporte del suelo. Cuando la obra es de envergadura, es necesario hacer los estudios previos correspondientes, ya que la naturaleza del suelo podría obligar a cambiar un alineamiento recto por otro curvo o a no utilizar total o parcialmente el cauce natural para colocar la alcantarilla, o a mejorar el material existente en los sitios que se requiera. Las estructuras de drenaje deben ser construidas, en general, para la misma *pendiente* del lecho del cauce. No tomar en cuenta la pendiente del drenaje natural puede provocar serias consecuencias.

Una alcantarilla con una pendiente demasiado baja provoca una reducción en la velocidad del flujo y, por lo tanto, reduce la capacidad hidráulica. La sedimentación producida por las bajas velocidades bloquea gradualmente el paso del agua durante períodos de flujo normal, hasta el punto en que un inesperado flujo puede causar una inundación. Por otra parte, una pendiente mayor que la del lecho de la corriente puede inducir un incremento de la velocidad capaz de desgastar y minar la estructura.

En lo que se refiere a la *elevación*, las alcantarillas deben colocarse preferiblemente con su fondo al ras del cauce y no más bajas. Cuando se requiere bajar el fondo del canal, es necesario reconformar también el lecho aguas abajo, ajustándolo a la nueva rasante y pendiente. Una limitación para ubicar una alcantarilla en el fondo del canal, podría ser la imposibilidad de lograr un sistema práctico para la conservación y mantenimiento; otra, el alineamiento horizontal, que en ningún caso debería tener quiebres bruscos. En el caso de no colocarse la alcantarilla en el fondo, debería ubicarse sobre terreno firme, a un lado del cauce natural.

Ahora bien, hay casos en que las recomendaciones anteriores deben variarse. Las circunstancias que a ello obligarían y las alternativas correspondientes son:

1. En zonas recientemente niveladas de declive relativamente suave, puede haber sedimentación; la alcantarilla puede colocarse unos centímetros más alta que el lecho de la corriente, pero conservando la misma pendiente.
2. Cuando la altura del terraplén es reducida, el colocar la alcantarilla más baja que el lecho de la corriente produce sedimentación y reduce el área hidráulica; aquí debe usarse una estructura ancha y de poca altura, como un tubo abovedado; en algunos casos puede elevarse la cota del camino.

3. Bajo terraplenes altos no siempre es necesario colocar el conducto al mismo nivel que el fondo de la corriente; si puede admitirse una elevación de agua a la entrada, la alcantarilla se puede colocar en un nivel más alto, reduciendo así su longitud. Colocar las alcantarillas por encima del cauce tiene como límite llevar la alcantarilla casi a nivel de la calzada, con lo cual queda un espacio sin drenaje entre el terreno natural y el terraplén. En estos casos, el terraplén deberá ser extendido hasta el terreno natural, ocupando de esta forma el volumen que existiría desde el nivel del cauce natural hasta la rasante de la obra de drenaje.
4. Bajo terraplenes altos, generalmente ocurre mayor asentamiento en el centro de la sección; la alcantarilla debe colocarse con una contra flecha: la mitad de aguas arriba casi horizontal, dándose la caída necesaria en la mitad aguas abajo.
5. En terrenos con pendientes fuertes, como las laderas, no siempre es necesario dar a las alcantarillas la misma pendiente abrupta; puede dársele la pendiente crítica y una salida con vertedero que evite la socavación; esto acorta el conducto y rebaja la cubierta.
6. En pendientes fuertes también es posible colocar bajo el terraplén un tubo con codo, aunque generalmente esto no se aconseja. Una entrada a un pozo colector permite dar a la alcantarilla una pendiente correcta.

#### **b) Uso de los distintos tipos y formas de alcantarillas**

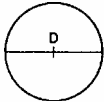
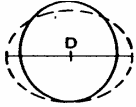
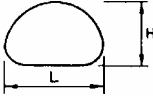
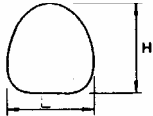
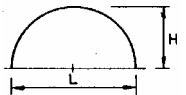
Las alcantarillas, según la clase del material que se emplea en su fabricación, pueden clasificarse en alcantarillas metálicas y alcantarillas de concreto; según la forma, en conductos redondos, ovalados o abovedados, cuadrados y rectangulares; y según el número de conductos que se empleen en un mismo lugar, en simples y múltiples o unicelulares y multicelulares.

Las *alcantarillas metálicas* son, generalmente, corrugadas, ya que esta condición aumenta la resistencia del material, acero o aluminio, a los esfuerzos. Las formas más utilizadas aparecen en la Figura 8.10, donde se indican usos y dimensiones usuales.

Las *alcantarillas de concreto*, según su forma, pueden ser alcantarillas de cajón (cuadradas, de una o varias celdas; rectangulares, de una o varias celdas), circulares y ovaladas.

En el caso de las alcantarillas de concreto, la elección de la forma debe ser hecha cuidadosamente, dependiendo ello, entre otros factores, de la topografía del lugar y de la eficiencia hidráulica y estructural y, por supuesto, de los costos de construcción

Inicialmente, la selección de la forma se hace buscando la que mejor se adapte al cauce del canal de drenaje. En canales estrechos y profundos, que lleven altos flujos en las épocas lluviosas, es más conveniente instalar alcantarillas estrechas y altas. En zonas planas, sin cauces definidos, el agua escurre en grandes volúmenes pero pequeñas alturas; en este caso, una alcantarilla de cajón de varias celdas o aberturas será la indicada.

FORMA		DIMENSIONES ( IN )	USOS COMUNES
CIRCULAR		6 A 252	Alcantarillas, sub.- drenajes de túneles, cloacas. Radio fijo. Para medianos y altos rellenos.
ELONGACION VERTICAL (ELIPSE) GENERALMENTE 5%		48 A 252 antes de la elongación	Alcantarillas, cloacas, servicio y recubrimiento de túneles. Radio variable. Se utiliza por la apariencia y donde la compactación es moderada
ABOVEDADO		L x H 18 x 11 a 247 x 158	Tiene ventajas hidráulicas para flujos pequeños y se utiliza cuando la altura del relleno es moderada.
PASO SUBTERRANEO*		L x H 68 x 69 a 244 a 214	Para peatones, paso de animales o vehículos.
ARCO		L x H 72 a 215 a 300 x 150	Para bajas aberturas con largos cursos de agua y por razones estéticas.
* Para igual área o abertura la forma circular es generalmente más económica y simple para ensamblar.			

**Figura 8.10 Formas mas utilizadas de alcantarillas metálicas.**

Las *alcantarillas de cajón* son adecuadas cuando trabajan bajo condiciones de compresión moderada o rellenos muy bajos; cuando las cargas de relleno aumentan; o cuando las presiones hidrostáticas internas son mayores que las cargas exteriores, esta forma de alcantarilla se hace menos económica.

Las alcantarillas de varias celdas se adaptan a rellenos moderados y a largos cursos de agua; son ventajosas cuando la pendiente del terreno es fuerte y la altura de relleno está restringida. En estas alcantarillas no se presentan problemas de fundación; sobre suelos que no soportan compresión o que tienen baja capacidad de carga, las presiones se distribuyen de forma más uniforme y sobre un área más ancha que en los otros tipos de alcantarillas; el asentamiento es menos probable y, por lo tanto, disminuye la posibilidad de hundimientos en la vía. En fundaciones sobre roca, el espesor de la losa de fondo puede ser reducido y, a veces, hasta eliminado mediante el uso de pequeñas bases.

Las *alcantarillas circulares* pueden ser prefabricadas o de diseño especial.

Las prefabricadas se utilizan cuando van a estar sometidas a cargas de relleno y cargas hidrostáticas, dentro de los límites normales. Cuando la eficiencia hidráulica es importante, como en el caso de alcantarillas largas, las características de las alcantarillas de concreto circulares son decisivas para su elección. En efecto, para un perímetro dado, la sección circular tiene mayor área que cualquier otra forma, lo que significa economía



de materiales. Además, para un área dada de sección circular se tendrá el mayor flujo debido al mayor radio hidráulico.

Las *alcantarillas de diseño especial* son vaciadas en sitio. Las de forma circular se utilizan debajo de grandes rellenos donde se prevén altas presiones. Son adecuadas para variadas condiciones de cargas, incluyendo grandes presiones internas. Se diseñan con la cara inferior relativamente plana, logrando de esta manera una distribución amplia de la carga, lo cual proporciona grandes espesores y resistencia en los lados y la transmisión uniforme de los grandes empujes a las fundaciones, y pequeños espesores en la parte superior para resistir las pequeñas presiones y fuerzas cortantes. En resumen, este tipo de alcantarilla tiene el diseño hidráulico de un tubo circular, las propiedades de soporte de un arco y una base plana tan útil como las alcantarillas de cajón.

Cuando las alcantarillas van a estar colocadas debajo de rellenos muy pesados o cuando las cargas verticales son moderadas pero las presiones laterales son muy pequeñas para ser efectivas en la reducción de momentos, el tipo de alcantarilla más económico a utilizar es el que tiene un tope parabólico. Esta forma se adapta más a la línea de presión de las cargas resultantes y, por lo tanto, gran parte de la carga se transmite como empuje directo, sin producir grandes momentos flectores.

Diferentes formas, incluyendo las parabólicas, semielípticas y ovoidales, son especialmente efectivas en estos casos y en el mantenimiento de buenas condiciones hidráulicas.

En cuanto a la clase de los materiales que se emplean para la fabricación, no puede decirse que exista uno que sea universalmente superior a los demás. El contenido químico de las aguas y la acción abrasiva de las corrientes varían de un lugar a otro y la experiencia enseña que en algunos sitios las aguas y los suelos ácidos corroen las alcantarillas de metal rápidamente, en tanto que en otros, algunas aguas minerales pueden desintegrar las estructuras de concreto.

Se ha comprobado que los siguientes factores afectan la vida de una alcantarilla: gasto que fluye a través de la alcantarilla, velocidad del flujo, contenido de sedimentos abrasivos, concentración de iones hidrógeno (PH) en el agua, concentración de iones hidrógeno (PH) en el suelo, resistividad eléctrica del suelo, contenido de carbonato de calcio, sulfatos y sólidos disueltos en el agua, características geológicas de los manantiales, presencia de compuestos orgánicos en el agua y afectación de la hoyo por materias contaminantes.

El acero galvanizado expuesto a una corriente de agua abrasiva sigue un ciclo de abrasión-corrosión-abrasión. El material abrasivo remueve la relativamente blanda superficie de cinc y expone la superficie del acero; éste se oxida y el óxido es arrastrado por las corrientes abrasivas. Este mecanismo de ataque ocasiona el desgaste progresivo del fondo de las alcantarillas de acero, habiéndose observado que los mayores daños son producidos más por el efecto corrosión del par abrasión-corrosión que por la abrasión sola. El proceso progresivo del ciclo abrasión-corrosión se ha observado con todo tipo de flujos abrasivos, incluyendo aquellos que arrastran arena y grava, acentuándose el desgaste cuando el agua es también corrosiva.

Cuando se utilizan conductos de aluminio, la resistencia del aluminio a la corrosión debería, teóricamente, eliminar la porción del ataque que corresponde a este agente. Esta resistencia surge de la protección que produce la delgada capa de óxido o película de aluminio que se forma en la superficie, la cual, cuando es dañada, se repone

instantáneamente. La película de óxido de aluminio es dura y tenaz, excelente dieléctrico e inerte a la mayoría de los agentes ambientales.

Sin embargo, también las alcantarillas de aluminio sufren el efecto de la corrosión, debido a que el metal que se usa en la construcción de las alcantarillas es una aleación. Los otros metales que se añaden para mejorar la resistencia afectan la estructura de la película de óxido, ocasionando puntos débiles en ella.

Cuando se produce el ataque en estos puntos, se forma una picadura en la superficie metálica, la cual queda posteriormente cubierta o desplazada por el óxido de aluminio resultante de la corrosión del sustrato del material. Este óxido protege el material subyacente del ataque subsiguiente, aunque el aluminio queda visiblemente picado como consecuencia de esta corrosión.

El comportamiento del aluminio bajo abrasión es, generalmente, independiente de la corrosión. La abrasión del fondo de la alcantarilla es el resultado acumulativo del impacto de partículas de dureza igual o mayor que la del metal. Factores tales como el tamaño de los fragmentos de roca, abundancia, velocidad del arrastre, forma y dureza, influyen notablemente en los efectos abrasivos.

A fin de proteger las alcantarillas contra la corrosión, se han empleado diversos tipos de recubrimientos y aleaciones: las alcantarillas de acero se galvanizan, y se emplean revestimientos asfálticos tanto en las alcantarillas galvanizadas como en las de aluminio; en condiciones críticas, las alcantarillas de acero se revisten de asfalto y asbesto mediante un proceso adhesivo especial, en tanto que las de concreto se recubren con plástico o arcilla vitrificada o se emplean cementos especiales.

## **8.6 DISEÑO HIDRAULICO DE LAS ALCANTARILLAS.**

El conocimiento del comportamiento del flujo a través de las alcantarillas permitió establecer las relaciones existentes entre la altura de agua a la entrada del conducto, el gasto y las dimensiones de la alcantarilla.

En muchos casos es difícil predecir el tipo de operación que se producirá para un gasto dado y determinada alcantarilla. En algunos casos, el control del flujo cambia al variar el caudal, fluctuando ocasionalmente de la entrada a la salida o viceversa. Es por ello que, cualquiera que sea el método de diseño que se siga, es necesario analizar ambos flujos, de manera de poder realizar el diseño para las condiciones mas adversas.

Diversos métodos han sido propuestos para el diseño hidráulico de las alcantarillas. Algunos de ellos siguen un procedimiento elaborado, el cual conduce a determinar la clase y tipo de operación del conducto, que corresponden a los métodos desarrollados por los Dpto. de Carreteras de Texas y Kentucky (USA.), este método ya no es usado por ser muy elaborado y antiguo. En los últimos tiempos se consideran los procedimientos abreviados de las "Hydraulic Engineering Circulars", como el mas sencillos de aplicar al diseño. A partir del año 1961 en que fue publicada la Hydraulic Engineering Circular num. 5, el método allí sugerido ha adquirido aceptación general y es la base actual para el diseño hidráulico de las alcantarillas.

Antes de proceder al diseño el proyectista deberá fijar el gasto de diseño la altura de agua permisible a la entrada, la altura de agua a la salida, la pendiente con que se colocara el conducto, su longitud y tipo de entrada que se ha seleccionado, y la velocidad del flujo permisible a la salida.

La Altura de agua permisible a la entrada (HEP) se considera como la máxima profundidad que deberá alcanzar el agua para garantizar un borde libre mínimo de 0,40 m. Entre la superficie del agua y el nivel de la subrasante de la carretera y evitar en lo posible inundaciones en las propiedades aguas arriba de la alcantarilla.

El conocimiento de la altura de agua a la salida es importante para determinar la capacidad de las alcantarillas que fluyen con control a la salida. En muchos casos, el canal de salida será relativamente ancho, y la profundidad del agua en el será menor que la altura de agua a la salida del conducto. En estos casos, la altura de agua a la salida no constituye un control, por lo que será innecesario calcularla. Otras veces, la altura de agua, aguas abajo, estará controlada por alguna obstrucción aguas abajo o por un remanso producido por la confluencia. Con otra corriente de agua.

En los casos en que se hace necesario determinarla, la altura de agua a la salida se considera como la profundidad normal del cauce o canal donde desemboca la alcantarilla. Cuando este es un cauce natural, de sección, pendiente longitudinal y rugosidad relativamente uniformes, la profundidad normal puede aproximarse mediante la formula de Manning, elaborando una curva de régimen. Esta curva representa el caudal que pasa por una sección no revestida (diferentes coeficientes de Manning), irregular a una determinada altura de agua.

La velocidad permisible a la salida deberá ser aquélla que evite la erosión del terreno en el canal de salida. Para canales no revestidos las velocidades máximas recomendables son las siguientes:

Tipo de suelo	Velocidades en m/seg.
Arena fina- no coloidal	0,75
Greda arenosa- no coloidal	0,75
Greda limosa- no coloidal	0,90
Greda firme	1,00
Greda fina	1,20
Arcilla dura- muy coloidal	1,40
Limos aluvionales- coloidales	1,40
Limos aluvionales- no coloidales	0,90
<b>Materiales gradados- no coloidales</b>	
Greda o grava	1,40
Limo a grava	1,60
Esquisto arcilloso	1,80
Grava	1,80
Grava gruesa	2,00
Grava a cantos rodados	2,30

**Tabla 8.3 Velocidades máximas recomendables en canales no revestidos**

Con los datos requeridos indicados anteriormente y utilizando un formato como el de la tabla del ejercicio de diseño(a continuación) y los nomogramas de las Figuras 8.1 a 8.10, el procedimiento de diseño hidráulico de las alcantarillas es el siguiente:

### 1. Determinación del tamaño de tanteo.

- a) Se emplean los nomogramas de las Figuras 8.1 a 8.4 Anexos (control a la entrada).
- b) Utilizando una relación HE/D y la escala que corresponde al tipo de entrada seleccionada, se determina el tamaño de tanteo siguiendo las indicaciones dadas sobre los mismos nomogramas.
- c) Si el tamaño así obtenido resultare excesivamente grande para las limitaciones impuestas por la altura del terraplén, se tantea con un valor de HE/D diferente o se utiliza una batería de alcantarillas, correspondiéndole a cada alcantarilla un gasto igual al gasto total dividido entre el número de conductos que se van a emplear. Otras alternativas a considerar, como la elevación del terraplén o el uso de tubos abovedados o cajones, deben analizarse también desde el punto de vista económico.

### 2. Calculo de la altura de agua a la entrada.

- a) Calculo de la altura de agua a la entrada, con control a la entrada.

Utilizando el nomograma de control a la entrada apropiado al tipo de alcantarilla y considerando el tamaño tentativo antes seleccionado, se determina en la escala correspondiente la relación HE/D. Se calcula  $HE = (HE/D) \times D$ .

- b) Calculo de la altura de agua a la entrada, con control a la salida.

La altura de agua a la entrada, HE, se calcula a partir de la ecuación

$$HE = H + h_o - S_o * L$$

En la que H se determina empleando el nomograma apropiado (control a la salida) al tipo de alcantarilla seleccionada (Fig. 8.5 a 8.10 de Anexo), considerando el tamaño tentativo ya determinado; y donde el valor de  $h_o$  depende de la altura de agua a la salida. Así, si HS es mayor o igual que la altura de la alcantarilla,  $h_o = HS$ . Si la salida no esta sumergida, como en el esquema b de la figura 6.11 de anexo, el valor de  $h_o$  será igual al mayor valor entre HS y  $(d_c + D)/2$  siendo  $d_c$  la altura critica en el conducto para el gasto de diseño, la cual se puede calcular con las curvas de las Figuras 8.11, a 8.15 de anexos, según se trate de conductos rectangulares, circulares o abovedados, respectivamente.

De la comparación de los valores HE obtenidos para el conducto funcionando con control a la entrada y control a la salida se obtiene, para el mayor de ellos, la ubicación de la sección de control para las condiciones de diseño fijadas.

### 3. Calculo de la velocidad a la salida.

- a) Alcantarillas que fluyen con control a la entrada.

Si se ha determinado que el control será a la entrada, la velocidad promedio a la salida puede aproximarse calculando la velocidad para el conducto trabajando como canal abierto, mediante la fórmula de Manning.

Para secciones no rectangulares, la velocidad normal puede calcularse determinando previamente la capacidad y velocidad a sección plena a partir de los gráficos de las Figuras 8.21 a 8.25 de anexo. Conocida la relación entre el gasto de proyecto y la capacidad a sección plena, con la ayuda del gráfico de la figura 6.26 de anexo, se determina la velocidad normal para el gasto de proyecto.

Para secciones rectangulares, el gráfico de la Figura 8.27 anexo, permite calcular la profundidad normal, de donde, aplicando la fórmula de Manning, la velocidad normal.

b) Alcantarillas que fluyen con control a la salida.

Si el control está a la salida, la velocidad promedio a la salida será  $V = Q/A$ , siendo A el área de la sección del flujo a la salida.

Si  $d_c$  o  $H_S$  son menores que la altura del conducto, se usará el A calculado con  $d_c$  o  $H_S$  (el que dé mayor área de flujo).

Si se ha determinado la velocidad a sección plena empleando las Figuras 8.21 a 8.25 de anexo, a partir de la relación  $d/D$  o  $H_S/D$  y utilizando también el gráfico de la Figura 8.26 de anexo, se obtiene el valor  $V/V_p$ , de donde se deduce el valor buscado.

## 8.7 EJERCICIOS DE APLICACIÓN.

### Ejemplo 1. Calculo de caudal (Método Racional).

Determinar el máximo caudal de descarga que necesita una alcantarilla para un periodo de retorno de 10 años y 100 años. En Cochabamba, sobre un área de 90 acres (0.405 ha.), zona rural empedrada un 80% y campos (suelo arcilloso) 20% del área total de drenaje. Dadas las constantes de regresión para 10 años:  $a = 185.51$  y  $b = 21.13$ . Para 100 años:  $a = 278.85$  y  $b = 23.60$ . (Valores del manual de drenaje en pulgadas /hora)

#### **Solución**

Paso 1: Recopile la información, datos de la utilización del suelo, información de la precipitación, topografía y determine el sitio del análisis:

Lugar: Cochabamba

Pasó 2: Área Del Drenaje: Del mapa topográfico y en campo, el área de drenaje en el lugar es de 90 acres. (36.422 ha.)

Uso del suelo: el drenaje es estimado de la siguiente forma:

Rural (empedrado)	80% del área total del drenaje.
Suelo arcilloso (pendiente del 2%)	20% del área total del drenaje.

Paso 3.

Superficie = Hierba Media.

Longitud del flujo por tierra = 1500 pies

Pendiente del terreno Promedio = 2,0%.

Longitud del canal principal = 2300 pies. (701.04 m.)

Pendiente del canal = 1,8%.

Paso 4. Calcular el Tiempo total concentración ( $t_c$ ).

El tiempo de concentración en base a la ecuación (8.2):  $T_c = 0.0195 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$

Tiempo de concentración para el canal:

L: longitud del canal en m: 701.04

H: diferencia de altura m. = L \* pendiente = 701.04 \* 1.8/100 = 12.62 m.

Reemplazando en 6.2:  $T_c = 0.0195 \left( \frac{701.04^3}{12.62} \right)^{0.385} = 14.22 \text{ min}$

Tiempo de concentración para el flujo por la superficie:

L: longitud del canal en m: 457.2

H: diferencia de altura m. = L \* pendiente = 457.2 \* 2/100 = 9.144 m.

Reemplazando en 8.2:  $T_c = 0.0195 \left( \frac{457.2^3}{9.144} \right)^{0.385} = 9.83 \text{ min}$

El tiempo total de concentración es la suma del flujo por canal mas flujo por la superficie: **24.05 min.**

Paso 5. Determine la intensidad de la precipitación I, usando las constantes de regresión.

La determinación de la intensidad es en base a curvas IDF o a constantes de regresión.

Dado a = 185.51 y b = 21.13 para 10 años en la ecuación de intensidad:

$I = \frac{a}{b + T_c}$  (pulgadas/hora), entonces para 10 años se tiene:  $I = \frac{185.51}{21.13 + 24.05} = 4.1 \text{ in/hr.}$   
igual a

Para 100 años: a = 278.85 y b = 23.60:  $I = \frac{278.85}{23.6 + 24.05} = 5.85 \text{ in/hr.}$

Paso 6. Determine el coeficiente de escorrentía C, del anexo Fig. 8.15.

Uso del Terreno	Porcentaje del área %	Coeficiente de escorrentía	Chef. De escorrentía en Porcentaje de área
Rural (empedrado)	80	0.35	0.28
Suelo arcilloso (Pendiente del 2%)	20	0.3	0.06
TOTAL COEFICIENTE DE ESCORRENTIA			0.34

Y Cf de la tabla 8.1 se tiene para 10 años Cf = 1.0 y para 100 años Cf = 1.25.

Entonces Cf (10) \* C = 0.34 \* 1.0 = 0.34 menor a 1.0 OK.

Cf (100) \* C = 0.34 \* 1.25 = 0.425 OK:

### Paso 7. Calculo de Descarga (Qt)

$$Q = C_f * C * I * A;$$

$$Q (10) = 0.34 * 4.1 * 90 = 125.46 \text{ pies}^3/\text{seg.} = 3.553 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$Q (100) = 0.425 * 4.1 * 90 = 156.825 \text{ pies}^3/\text{seg.} = 4.441 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

### Ejemplo 2. Diseño de alcantarillas.

Diseñar una alcantarilla de metal corrugado con entrada proyectante de 54" a 60" (por disponibilidad del lugar), dados los siguientes datos: caudal de diseño para 25 años 5 m<sup>3</sup>/seg., para 50 años 10 m<sup>3</sup>/seg. Profundidad de salida estimada 0,91 m., carga permisible a la entrada 3 m. (por el terraplén), cota rasante carretera 120 m. cota rasante entrada alcantarilla 100 m. pendiente alcantarilla 5%, longitud alcantarilla 60 m. velocidad permisible canal de salida 6 m/seg. (Canal revestido).

#### **Solución:**

En la siguiente tabla de diseño se completa los datos del proyecto, luego probar con un caudal de frecuencia de 25 años con el diámetro de 60", **columna 1 y 2** de la planilla.

#### **Diseño Control a la entrada:**

De la Figura 8.2 anexo, con los valores de la **columna 1 y columna 2**, se tiene la **columna 3**  $H_E/D = 1.48$  aprox. OK.

Despejo  $H_E$  de la relación  $H_E/D$ , en la **columna 4**, dando  $H_E$  igual a 2.25 m.

#### **Diseño Control a la salida:**

De la Figura 8.20 anexo CE, para entrada proyectante(o extremo saliente), 0.9. **columna 5**

De la Figura 8.6 anexo, siguiendo los pasos de la lámina se tiene en la **columna 6**  $H = 1.7$ .

**Columna 7.** Calculo de  $d_c$  de la Figura 8.12 anexo,  $d_c$  próximo a 1.12.

**Columna 8,**  $(d_c + D)/2$  igual a **1.32 m.**

**Columna 9,**  $H_s$  altura a la salida estimada.

**Columna 10,**  $h_o$  el mayor entre  $H_s$  y  $(d_c + D)/2$ , entonces  $h_o$  igual a 1.32 m.

**Columna 11,** calcular  $S_o * L$  igual a 3 m.

**Columna 12,** calculo de  $H_E$  de la ecuación:  $H_E = H + h_o - S_o * L$ , igual 0.02 m.

**Columna 13,** el mayor entre  $H_E$  columna 4 y  $H_E$  columna 12, que es 2.25 m.

**Columna 14,** de la Figura 8.22 anexo o hallar la  $h_n$  de Manning, se tiene  $v = 4,6$  m/s, aprox.

**Conclusión:** como no se alcanzo la velocidad máxima ni la altura  $HED$  máximo, se prueba con  $D = 54"$

Entonces al probar con  $D = 54"$ , se tiene los valores de la tabla, los valores, con este diámetro cumple, entonces probar con una descarga de 50 años de frecuencia.

Al probar con este diámetro, la altura a la entrada se sobrepasa, pasar al diámetro superior.

Con el diámetro  $D = 60"$ , cumple satisfactoriamente las condiciones de inicio.

**Ejemplo 3.**

Dado un caudal de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ . y un tubo de concreto de 48", calcular la altura a la entrada de la alcantarilla, que tenga menor carga sobre el terraplén de la carretera.

**Solución:**

Con los datos dados, en la Figura 8.1 de los anexos se tiene lo siguiente:

Tipo	HE/D	HE (m)
(1)	1,95	2,4
(2)	1.65	2,0
(3)	1.70	2.1

De donde la alcantarilla con entrada tipo (2) es la que tiene menor carga sobre el terraplén de la vía.

**Ejemplo 4.**

Hallar la altura de carga en un tubo circular de concreto de 48", con aletas a  $45^\circ$  longitud 40 m.

Y un caudal de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Solución:**

De la Figura 8.6 de anexos, siguiendo los pasos se tiene  $H = 0.55 \text{ m}$ .

**Ejemplo 5.**

Diseñar una alcantarilla usando dos secciones cajón cuadradas de concreto armado ( $n = 0.012$ ), con entrada Tipo III, aletas o muros de cabecera  $\alpha = 0^\circ$ , con salida no sumergida, dados los siguientes datos:

$Q_{\text{diseño}} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

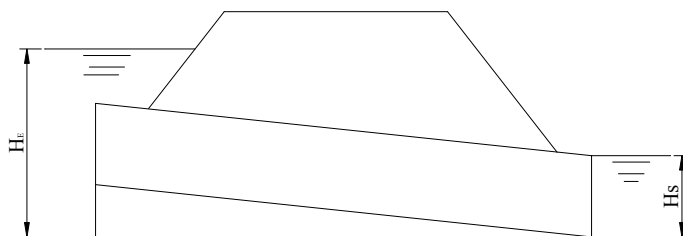
Profundidad de salida 1.00 m.

Carga permisible a la entrada 3.25 m.

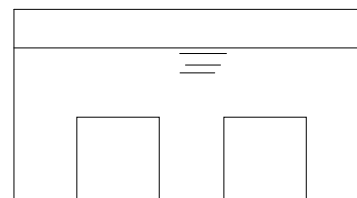
Pendiente de la alcantarilla 1%.

Velocidad permisible de salida 4 m / s.

Longitud alcantarilla 50 m.



VISTA LONGITUDINAL



VISTA FRONTAL DE LA ENTRADA

NOTA: Usar dos decimales en los valores de tablas, y múltiplos de cinco (redondeo).



**Solución:**

Como se usan dos secciones cajón entonces el caudal de diseño por alcantarilla es:  $Q_i = Q_t / 2$

$$Q_i = 8/2 = 4 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Con la ecuación de continuidad se toma la primera sección de diseño de las alcantarillas:  
 $A = Q_i / V$

$$A = B \cdot B; \quad B = (Q_i / V)^{0.5} = (4/4)^{0.5} = 1,0 \text{ m} \text{ entonces tomar Área de } 1,0 \text{ por } 1,0 \text{ m}^2$$

Diseño control a la entrada:

Con la Figura 8.4 anexos y  $Q/B = 4,0$  se tiene  $H_E/D \cong 3.2$  entonces  $H_E = 3.20 \text{ m}$ .

Diseño control a la salida:

Figura 8.20 anexo hallar  $C_E$  con los datos del tipo de control a la entrada se tiene  $C_E = 0.7$

Hallar  $H$  en la Figura 8.10 anexo con el Área  $A = 1.0 \text{ m}^2$  se tiene  $H \cong 2.25 \text{ m}$ .

Hallar  $d_c$ , con la Figura 8.11 anexo; con  $Q/B = 4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , se tiene  $d_c = 1.0 \text{ m}$ .

Calcular  $(d_c + D)/2$ , reemplazando se tiene  $1.0 \text{ m}$ .

$H_s = 1.0 \text{ m}$  dato.

Calcular  $h_0$  que es el mayor entre  $(d_c + D)/2$  y  $H_s$ , entonces  $h_0 = 1.0 \text{ m}$ .

Calcular  $L \cdot S_0$   $50 \cdot 1/100 = 0.50 \text{ m}$ .

Calcular  $H_E = H + h_0 + L \cdot S_0 = 2.25 + 1.0 - 0.5 = 2.75 \text{ m}$ .

Entonces  $H_E$  es el mayor calculado entre los métodos de control a la entrada y salida que es  $H_E = 3.20 \text{ m}$  y es menor al máximo permitido  $3.25 \text{ m}$  OK!

La velocidad de salida con Manning  $V = 1/n \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{0.5}$  se tiene  $4.006 \text{ m/s}$  que es próximo a la velocidad permisible  $4.0 \text{ m/s}$ .

Conclusión para estas condiciones la sección cuadrada que satisface es una de  $1.0 \text{ m}$  por  $1.0 \text{ m}$ .

## 8.8 APLICACIÓN DE PROGRAMAS EN EL DISEÑO DE ALCANTARILLAS.

Para el cálculo de caudal de diseño para drenajes superficiales se encuentra disponible el programa "CALCANT" elaborado por Daniel Prudencio Cortés en la UMSS. Este programa contiene el método Racional expuesto en este capítulo, además contiene el diseño con hidrogramas unitarios.

Para el diseño de alcantarillas se tienen disponibles de forma gratuita los siguientes programas que tienen como base el método expuesto anteriormente:

- CALCANT, Elaborado por Daniel Prudencio Cortés en la UMSS.
- HIDROCALC, programa americano de libre uso elaborado por DODSON.
- CULVERMASTER, elaborado por Haestad Methods.

### 8.8.1 Aplicaciones para el cálculo de caudal de diseño.

El uso del programa CALCANT en el cálculo de caudal de diseño se tiene establecido a continuación con el siguiente ejemplo:

#### Ejemplo 6.

Determinar el caudal máximo de descarga que necesita una alcantarilla para un periodo de retorno de 25 años, en Cochabamba sobre un área de 5 Km<sup>2</sup>, el cauce principal tiene una longitud de 2 Km. y una pendiente de 0.1 %, se tiene una precipitación de 150 mm, en la zona de diseño, un coeficiente de escorrentía de 0.34 para un suelo arcilloso, diseñar con el método Racional.

#### Solución:

Al entrar al programa CALCANT, entrar a: **Calcular / Caudal de Proyecto.**

Aquí aparece la ventana: **Calculo del caudal del proyecto.**

A continuación llena la planilla con los datos del proyecto como se muestra en la siguiente figura:

Aceptar la información: apretando **Continuar.**

En la ventana **Datos adicionales**, completar con el coeficiente de escurrimiento y en la ventana **tiempo de concentración** elegir promedio como se muestra a continuación:

**Programa para el cálculo de alcantarillas de caminos**

Archivo Calcular Reporte Ventana Ayuda

**Datos Adicionales**

Método Racional:  
Coeficiente de Escurrimiento: 0.37

Precipitación Efectiva:  
Número de curva (CN):

Hidrograma Unitario de I- Pay- Wu:  
Pendiente (Taylor- Schwarz) [%]:

Hidrograma Unitario de Gray:  
Pendiente Promedio [%]:

Tiempo de Concentración

Aceptar

Continuar

**Tiempo de Concentración**

Escoja un valor para el Tiempo de Concentración [hrs]:

- ☐ Kirpich 1.6145
- ☐ Passini 2.3000
- ☐ Pizarro 23.1030
- ☐ Témez 0.7738
- ☐ Forest Resources Division 1.5693
- ☒ Promedio 5.8721

Continuar

Como solución se tiene como la siguiente tabla que da como resultado el caudal máximo con el método Racional.

**Resultados del análisis hidrológico**

Nombre de la cuenca de la Cuenca: EJEMPLO 6

Área de la Cuenca [km<sup>2</sup>]: 5      Periodo de Retorno [años]: 25

Desnivel del Cauce Principal[m]: 2      Longitud del Cauce Principal [km]: 2

Tiempo de Concentración [hrs.]: 5.8721

Precipitación de Diseño [mm]: 150      Precipitación efectiva [mm]: 0.000

---

Método Racional:  
Coeficiente de escurrimiento: 0.37  
Caudal Máximo [m<sup>3</sup>/s]: 77.145

### 8.8.2 Diseño de alcantarillas con CALCANT

El diseño de alcantarillas con el programa CALCANT, se expone a continuación usando los datos del ejemplo 2, para así dar una comparación del diseño manual con respecto a la aplicación del programa

#### Ejemplo 7.

Diseñar una alcantarilla para un caudal de 5 m<sup>3</sup>/s y para una tubería de 60" (1.5 m), y los datos del ejemplo 2. Donde la cota solera a la salida es 2500 m.s.n.m. y un coeficiente de manning 0.024.

#### Solución:

En el programa CALCANT entrar a: **Archivos / Administrador de proyectos.**

En Administrador de proyecto: **Agregar proyecto:** nombrar el proyecto como ejemplo 7, llenar los datos que se piden del proyecto **Aceptar y Continuar.**

En **Agregar sección:** crear la sección Metal, luego apretar **Editar sección.**

En la ventana **Cálculo hidráulico de alcantarillas**, llenar las casillas apretando previamente **Modificar**, luego de llenar los datos apretar **Calcular**. Como muestra la siguiente pantalla:

Obteniendo como resultados la velocidad a la salida de la alcantarilla en la pantalla. Y se obtiene un reporte completo en la opción del programa: **Reporte de Hidráulica**.

## 8.9 EJERCICIOS PROPUESTOS

- 8.1** Calcular el caudal de diseño por el método racional con los siguientes datos: Periodo retorno de 10 años y 100 años. En Cochabamba, Sobre un área de 1000 acres, Zona rural empedrada un 50% y campos (suelo arcilloso) 50% del área total de drenaje. Dadas las constantes de regresión para 10 años:  $a = 185.51$  y  $b = 21.13$ . Para 100 años:  $a = 278.85$  y  $b = 23.60$ . (Valores del manual de drenaje en pulgadas /hora)
- 8.2** Determinar la dimensión de una alcantarilla tipo cajón para las siguientes condiciones. Ancho dos veces el Alto.  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $HS = 0.7 \text{ m}$ ,  $vs = 0.3 \text{ m/s}$ ,  $L = 45 \text{ m}$ ,  $So = 0.8\%$ , altura a la entrada 2.5 m.
- 8.3** De la Figura 8.2 a 8.5 anexo resolver los ejemplos, para los distintos tipos de material, haciendo como variable para cada ejemplo el caudal.
- 8.4** los valores dados para una alcantarilla circular de concreto con control a la entrada, con entrada tipo II, para un diámetro de tubería de 3 pies, desea evacuar  $70 \text{ pies}^3/\text{s}$ , determinar la altura máxima a la entrada de la alcantarilla.

## 8.10 BIBLIOGRAFIA.

Villón Béjar Máximo. "Diseño de estructuras hidráulicas". Instituto Tecnológico de Costa Rica – Departamento de Ingeniería Agrícola. Primera edición, agosto del 2000.

Institución de enseñanza en ciencias agrícolas. "Manual de Proyectos de Pequeñas obras Hidráulicas para riego, Tomo 2, Chapingo 1980.

Carciente Jacob, Estudio y proyecto de Carreteras, 2 Edición Vega, Caracas, Venezuela.

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DE VIRGINIA, Manual de Drenaje, abril del 2002.  
Vínculo en Internet: <http://www.virginiadot.org/>

Software DISEÑO DE DRENAJE PLUVIAL, Daniel Antonio Prudencio Cortez, UMSS.