

**LIBRO:** PRY. PROYECTO  
**TEMA:** CAR. Carreteras  
**PARTE:** 4. PROYECTO DE DRENAJE Y SUBDRENAJE  
**TÍTULO:** 03. Proyecto de Sistemas de Subdrenaje  
**CAPÍTULO:** 002. Determinación del Gasto de Diseño

**A. CONTENIDO**

Este Manual contiene los procedimientos para determinar el gasto hidráulico de diseño a que se refiere la Norma N·PRY·CAR·4·03·002, *Determinación del Gasto de Diseño*, el cual es necesario para definir y proyectar las obras de subdrenaje de carreteras.

**B. DEFINICIONES**

**B.1. BOMBEO**

Es la pendiente transversal que se le proporciona a la superficie de rodadura de la carretera, para permitir que el agua de lluvia que sobre ella caiga escurra hacia los hombros del camino.

**B.2. GASTO DE DISEÑO**

Es el volumen de agua que pasa en determinado tiempo por un medio permeable, en este caso del terreno bajo el cual se diseñará la obra de subdrenaje.

**B.3. GASTO DE INFILTRACIÓN**

Es el volumen de agua que ingresa en el pavimento por metro cuadrado dependiendo, entre otros factores, de la permeabilidad de las capas del pavimento.

**B.4. RED DE FLUJO**

Es una solución gráfica bidimensional al teorema de Laplace, que se resuelve a través de las siguientes dos familias de curvas ortogonales:

- Las líneas de flujo, que representan las rutas por donde pasan las partículas de agua a través del suelo cuando existe un gradiente hidráulico.
- Las líneas equipotenciales, que representan los puntos por donde se tiene la misma carga hidráulica.

**C. REFERENCIAS**

Este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS	DESIGNACIÓN
Ejecución de Proyectos de Subdrenaje .....	N·PRY·CAR·4·03·001
Determinación del Gasto de Diseño .....	N·PRY·CAR·4·03·002

## D. REQUISITOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL GASTO DE DISEÑO

En los sistemas de subdrenaje que se proyecten, será necesario contar previamente con los estudios indicados en la Cláusula D. de la Norma N-PRY-CAR-4-03-001, *Ejecución de Proyectos de Subdrenaje*, siendo necesario en todos los sistemas de subdrenaje los estudios indicados en las Fracciones D.1., D.2., D.3. y D.6. de esa Norma, y en el caso de los sistemas de subdrenaje consistentes en drenes de penetración transversal, trincheras estabilizadoras y galerías filtrantes, se complementarán con los indicados en las Fracciones D.4. y D.5.

## E. DETERMINACIÓN DEL GASTO DE DISEÑO

Los procedimientos contenidos en este Manual para determinar el gasto hidráulico de diseño, requerido para definir un sistema de subdrenaje, consideran el efecto del agua libre gravitacional existente en el interior de las laderas de los cortes aledaños de la carretera y el efecto del agua infiltrada en la superficie de un pavimento.

### E.1. RED DE FLUJO

Para determinar el gasto de diseño, es necesario definir la línea superior de corriente y dibujar una red de flujo en una o más secciones transversales representativas del sitio de análisis, como se muestra en la Figura 1 de este Manual.

#### E.1.1. Consideraciones para aplicar una red de flujo

- El suelo y el agua son incompresibles en sí mismos, lo que significa que el volumen de vacíos es constante.
- El flujo o filtración del agua no modifica la estructura del suelo de ninguna forma.
- El agua en el suelo tiene un régimen permanente y flujo estacionario.
- El suelo en el que se analiza la filtración está saturado.
- El flujo del agua a través del suelo es de tipo laminar, con baja velocidad de filtración.
- Se considera válida la Ley de Darcy, que establece que la velocidad de descarga,  $v$ , se obtiene como el producto del coeficiente de permeabilidad del suelo,  $K_s$ , y el gradiente hidráulico,  $i$ .
- El coeficiente de permeabilidad es constante en todos los puntos del suelo, lo cual supone que no existe anisotropía.

#### E.1.2. Trazo de una red de flujo

Las redes de flujo de los suelos se pueden obtener por varios métodos experimentales, sin embargo, el procedimiento más conveniente y económico consiste en trazar la red manualmente.

##### E.1.2.1. Consideraciones

Para el trazo de las familias de líneas de flujo y líneas equipotenciales, es necesario considerar que en cada punto de la zona de estudio pasará una línea de flujo y una línea equipotencial, ya que en cada lugar del flujo el agua tiene una velocidad y una carga hidráulica. Si se trazaran todas las líneas posibles, se formaría una mancha uniforme, lo cual no tendría valor práctico. Por lo tanto, sólo es necesario seleccionar y trazar algunas líneas de flujo y líneas equipotenciales.

**E.1.2.2. Procedimiento de trazado de una red de flujo**

Se recomienda aplicar el siguiente procedimiento para el trazo de una red de flujo en la sección de un sitio en estudio:

- Se examinan las condiciones que existen en las líneas de frontera, por ejemplo, la superficie del estrato impermeable.
- Se examinan las condiciones hidráulicas de borde del sitio en estudio, es decir, determinar si se conocen anticipadamente algunas líneas de flujo o equipotenciales.
- Se trazan las líneas de flujo; una primera aproximación es trazar varias curvas suaves que representen líneas de corriente, considerando un número de canales de flujo entre 4 y 5.
- Se trazan las líneas equipotenciales de manera que la caída de carga hidráulica entre cada dos de ellas sea la misma; esto se logra formando cuadrados curvilíneos con las líneas de flujo.
- La transición entre rectas y curvas será suave y en forma parabólica o elíptica.
- Se trazan líneas equipotenciales y de flujo siempre completas.
- Se examina cuidadosamente la red de flujo trazada, para identificar los defectos más visibles, sin tratar de corregirla con detalle hasta que toda ella esté aproximadamente bien trazada.
- En caso de que no se cumplan los puntos anteriores, se trazará una nueva red y se prosigue con el procedimiento de ajuste.

**E.1.2.3. Ejemplo de trazo de una red de flujo**

En la Figura 1 de este Manual se presenta el ejemplo de una red de flujo de una represa de agua contenida por una pantalla de tablestacas que está desplantada en un suelo permeable, en la que pueden observarse las líneas de flujo con rayas continuas y las líneas equipotenciales con rayas discontinuas, a través de la masa del suelo permeable.

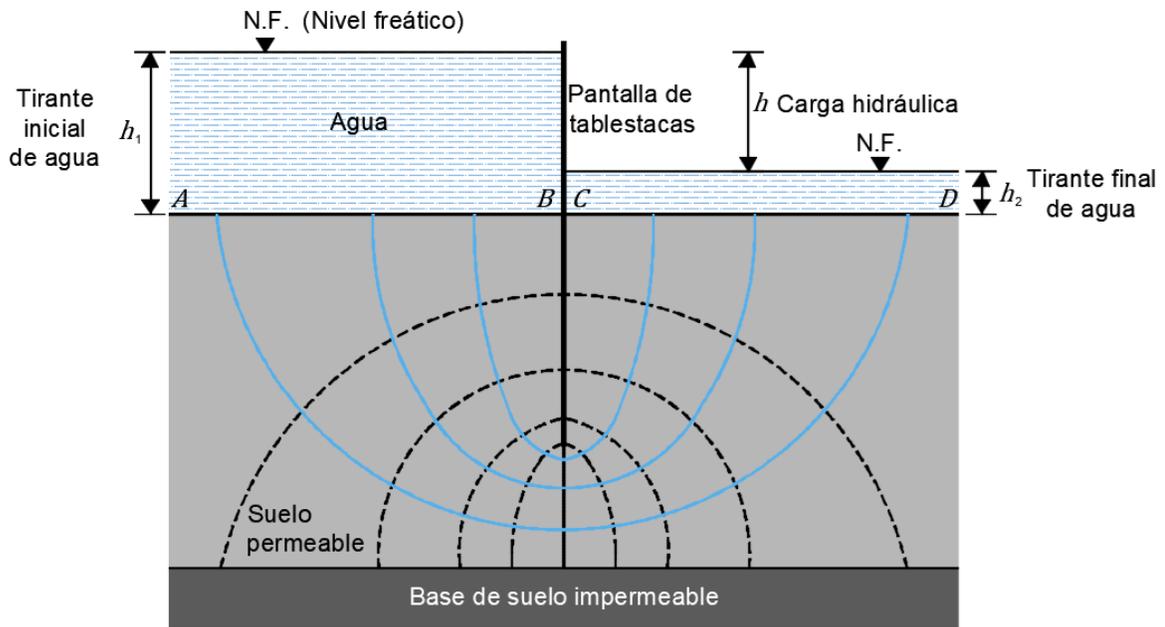


FIGURA 1.- Ejemplo de una red de flujo de agua en un suelo permeable

Cada línea de flujo comienza en un punto localizado sobre la línea  $AB$ , con una carga de presión  $h_1$  que se disipa por el suelo permeable y termina en la línea  $CD$ , donde la carga de presión es igual a  $h_2$ . La diferencia entre  $h_1$  y  $h_2$  se denomina carga hidráulica,  $h$ .

A todo lo largo de la línea de flujo existe un punto donde el agua ha disipado una carga específica, conocida como su potencial. Una línea que conecte todos esos puntos de igual carga se denomina línea equipotencial, indicada con rayas discontinuas en el ejemplo de la Figura 1 de este Manual, lo cual significa que en todos los puntos de una misma línea equipotencial el agua tiene un mismo nivel piezométrico.

Estas líneas se asemejan a curvas de nivel de igual energía y las líneas de flujo las cortan en ángulo recto, ya que el agua se mueve desde los niveles de mayor a los de menor energía, siguiendo las rutas de gradiente de máxima energía, de la misma forma en que el agua corre hacia abajo en la ladera de una colina, de los niveles superiores a los inferiores, siguiendo la misma línea de máxima pendiente.

En la Figura 2 de este Manual, se indican con mayor detalle las líneas de flujo y las líneas equipotenciales, con sus correspondientes valores de variación.

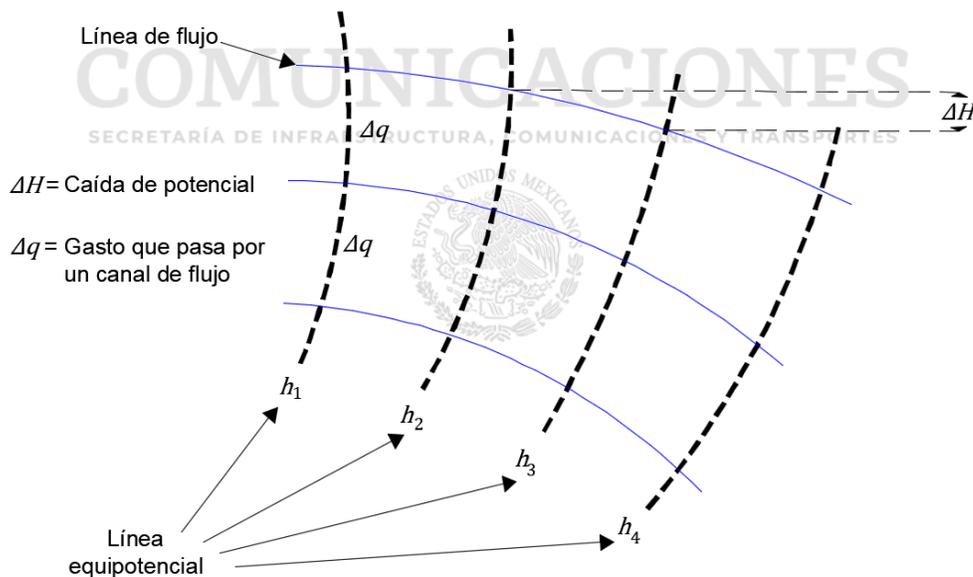


FIGURA 2.- Canales de flujo del agua y caídas equipotenciales

Para la determinación de las condiciones hidráulicas de frontera, se establecen las condiciones de carga hidráulica y circulación de flujo en todos los puntos límite de la sección que se estudie. Estas condiciones, para el ejemplo de la pantalla de tablestacas de la Figura 3 de este Manual, están definidas por cuatro líneas significativas:

- La línea  $AB$ , incluyendo su prolongación hacia la izquierda hasta donde se extienda la sección, es una línea equipotencial a lo largo de la cual la altura de agua es igual a  $h_1$ , o primera línea equipotencial.
- La línea  $CD$ , incluyendo su prolongación hacia la derecha, es una línea equipotencial a lo largo de la cual la altura del agua para este problema es igual a  $h_2$ , o última línea equipotencial.

- Desde el punto *B*, el cual toca la tablestaca en la superficie de la interfaz suelo-agua, la línea que sigue la superficie impermeable de la tablestaca hacia abajo hasta el punto *E* y después hacia arriba por el otro lado de la tablestaca hasta el punto *C*, o primera línea de flujo.
- La línea *FG*, incluyendo sus extensiones hacia ambos lados derecho e izquierdo, que representa la última línea de flujo.

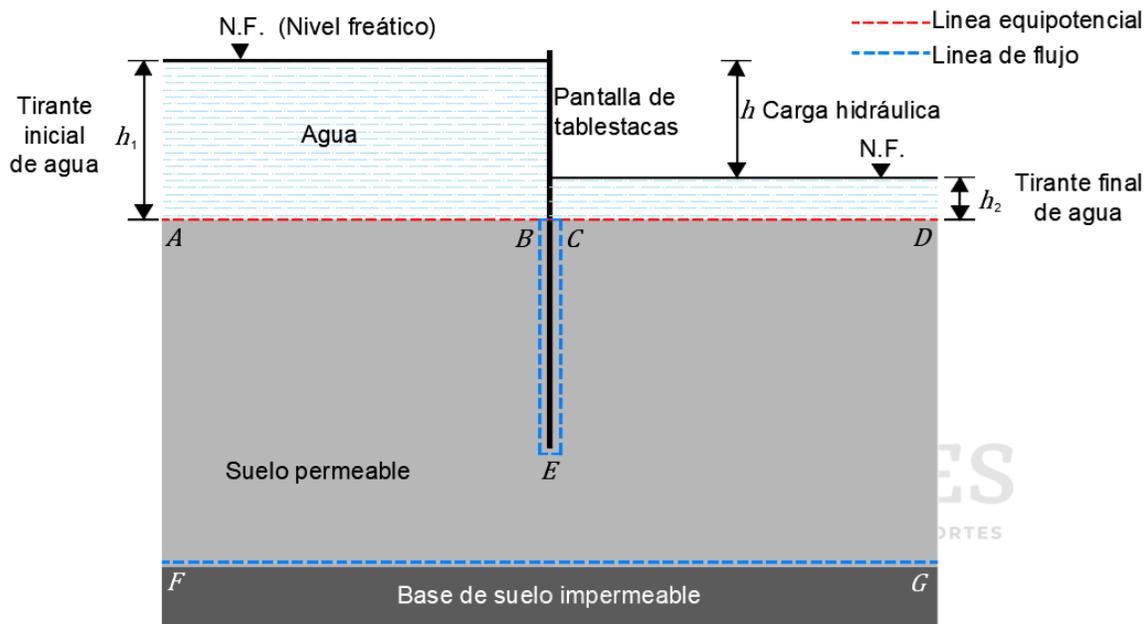


FIGURA 3.- Determinación de las condiciones hidráulicas de frontera

### E.1.3. Determinación del gasto de diseño en una red de flujo

Para determinar el gasto de diseño a través de una red de flujo, se aplica la siguiente expresión, obtenida con base en la Ley de Darcy y considerando el recuento de los canales de flujo y las caídas equipotenciales a que se refiere el Inciso anterior.

$$Q = Ks \times h \times \frac{N_f}{N_e}$$

Donde:

- $Q$  = Gasto de agua por ancho unitario, ( $m^3/s$ )
- $Ks$  = Coeficiente de permeabilidad del subsuelo, (m/s), conforme a lo establecido en la Norma N-PRY-CAR-4-03-002, *Determinación del Gasto de Diseño*
- $h$  = Carga hidráulica, (m)
- $N_f$  = Número de canales de flujo en la red, (adimensional)
- $N_e$  = Número de caídas de potencial hidráulico, (adimensional)

En caso de que la condición de flujo de agua bajo el nivel freático de una zona en estudio se apegue a las condiciones de un suelo anisótropo, flujo laminar, gradiente hidráulico y una red de flujo definidos, orientado hacia un sistema de subdrenaje por proyectar, se podrá aplicar la ecuación indicada en este Inciso para determinar el gasto de diseño que podrá ser desalajado por un sistema de subdrenaje.

## E.2. DETERMINACIÓN DEL GASTO DE DISEÑO DEBIDO A INFILTRACIÓN DE AGUA EN EL PAVIMENTO

Para determinar el gasto de diseño en un pavimento rígido o asfáltico debido a la infiltración de agua en su superficie, se emplea alguno de los métodos que se indican a continuación.

### E.2.1. Método de la relación de infiltración

Con este método se determina la cantidad de agua que ingresa al pavimento por infiltración, asumiendo que una porción fija de la lluvia que cae sobre el pavimento ingresa en él. De esta manera, los datos requeridos son únicamente la lluvia de diseño y la relación de infiltración, a partir de los cuales se determina la tasa de infiltración de agua en el pavimento mediante la siguiente expresión:

$$q_i = 0,024 \times C \times R$$

Donde:

- $q_i$  = Gasto de infiltración en el pavimento, (m<sup>3</sup>/día/m<sup>2</sup>)
- $C$  = Relación de infiltración, (adimensional)
- $R$  = Volumen de la lluvia, (mm/h)

Para la aplicación de este método se considera lo siguiente:

**E.2.1.1.** La relación de infiltración  $C$  representa la porción de la lluvia que ingresa al pavimento a través de sus juntas y grietas. Se recomienda que el valor empleado se encuentre dentro de los siguientes parámetros:

- Entre 0,33 y 0,50 para pavimentos asfálticos (pavimentos flexibles).
- Entre 0,50 y 0,67 para pavimentos de concreto hidráulico (pavimentos rígidos).

Sin embargo, considerando que el valor por aplicar no resulta fácil de establecer en un determinado estudio, se sugiere emplear un valor de 0,5 para cualquier pavimento.

**E.2.1.2.** El Ingeniero proyectista podrá seleccionar la frecuencia y la duración de la lluvia a partir de la cual determinará el volumen de lluvia para realizar un sistema de subdrenaje. Se sugiere utilizar una lluvia de diseño con periodo de retorno de 2 años y de 1 hora de duración.

### E.2.2. Método de infiltración a través de las grietas

En este método, el gasto de infiltración en el pavimento debido a la infiltración de agua a través de las grietas se determina mediante la siguiente expresión:

$$q_i = I_c \times \left( \frac{N_c}{W} + \frac{W_c}{W \times C_s} \right) + k_p$$

Donde:

- $q_i$  = Gasto de infiltración en el pavimento, (m<sup>3</sup>/día/m<sup>2</sup>)
- $I_c$  = Gasto de infiltración en las grietas, por metro lineal de éstas, (m<sup>3</sup>/día/m)
- $N_c$  = Número de juntas o grietas longitudinales, (adimensional)
- $W_c$  = Longitud de las juntas o grietas que contribuyen, (m)
- $C_s$  = Espaciamiento promedio entre juntas o grietas transversales, (m)
- $W$  = Ancho de la base con bombeo uniforme, (m)
- $k_p$  = Permeabilidad del pavimento sin juntas ni grietas, (m<sup>3</sup>/día/m<sup>2</sup>)

En la Figura 4 de este Manual se identifica, en planta, la longitud de juntas o grietas transversales que contribuyen a la infiltración,  $W_c$ , el espaciamiento entre ellas,  $C_s$ , y el ancho de la base permeable,  $W$ ; en tanto que en la Figura 5 de este Manual se muestran las mismas dimensiones en un corte transversal, para un pavimento con el mismo bombeo en los 2 carriles.

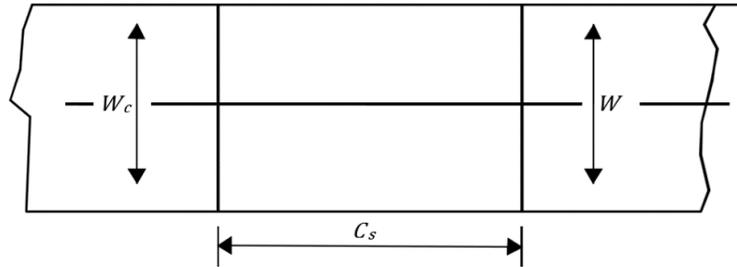


FIGURA 4.- Esquema en planta de los parámetros para aplicar el método de infiltración a través de grietas en 2 carriles con el mismo bombeo

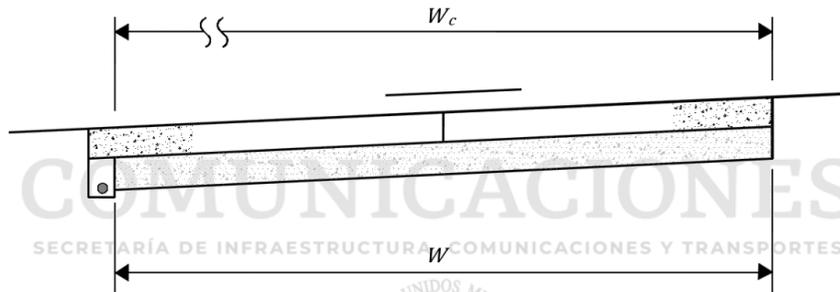


FIGURA 5.- Esquema en perfil de los parámetros para aplicar el método de infiltración a través de grietas en una sección con el mismo bombeo para los 2 carriles

Para la aplicación de este método se considera lo siguiente:

- E.2.2.1. Se recomienda emplear un valor para el gasto de infiltración en las grietas,  $I_c$ , de  $0,22 \text{ m}^3/\text{día}/\text{m}$  de junta, para evitar seleccionar la lluvia de diseño y su volumen de infiltración.
- E.2.2.2. El número de juntas y grietas longitudinales,  $N_c$ , depende de la geometría de la carretera y en particular del número de carriles,  $N$ , que contribuyen a la infiltración con el mismo bombeo, bajo la relación siguiente:

$$N_c = N + 1$$

Donde:

- $N_c$  = Número de juntas o grietas longitudinales, (adimensional)
- $N$  = Número de carriles con bombeo uniforme, (adimensional)

Si la carretera tiene 2 carriles con un bombeo uniforme, el valor  $N$  es de 2 y, consecuentemente,  $N_c$  será igual a 3.

- E.2.2.3. Respecto al parámetro  $C_s$ , el espaciamiento normal en los pavimentos de concreto hidráulico corresponde a la separación media entre las juntas transversales; mientras que, en el caso de los pavimentos asfálticos, se pueden aplicar valores específicos obtenidos como resultado de observaciones locales sobre el desarrollo de grietas transversales a intervalos regulares. Para pavimentos asfálticos nuevos, se sugiere considerar un valor de 12 m.

**E.2.2.4.** Respecto a la longitud de las juntas o grietas que contribuyen,  $W_c$ , se recomienda que en su valor se incluya tanto el ancho del pavimento como los acotamientos. Este criterio resulta conservador, al considerar que el agua de todo el ancho de corona pueda ingresar a la base permeable, razón por la cual resulta recomendable suponer que  $W_c$  es igual al ancho de la base con bombeo uniforme  $W$ . Para seleccionar  $W$ , el Ingeniero proyectista definirá si la base descargará en un subdrén longitudinal o en el talud del terraplén.

**E.2.2.5.** La permeabilidad de un pavimento nuevo sin juntas ni grietas,  $k_p$ , para un pavimento de concreto hidráulico con las juntas bien selladas o para un pavimento asfáltico con sus capas bien compactadas, se puede suponer igual a 0.

## F. EJEMPLOS SOBRE LA DETERMINACIÓN DEL GASTO DE DISEÑO

### F.1. APLICACIÓN EN UNA RED DE FLUJO

A continuación, se presenta un ejemplo para determinar el gasto de diseño para brindar una solución de subdrén longitudinal en el talud de un corte, con un coeficiente de permeabilidad  $K_s$  de  $1 \times 10^{-5}$  cm/s ( $1 \times 10^{-7}$  m/s), que tiene un nivel freático que fluye hacia el talud y en consecuencia hacia la zona del pavimento, con la ubicación y posición acotada que se indica en la Figura 6 de este Manual.

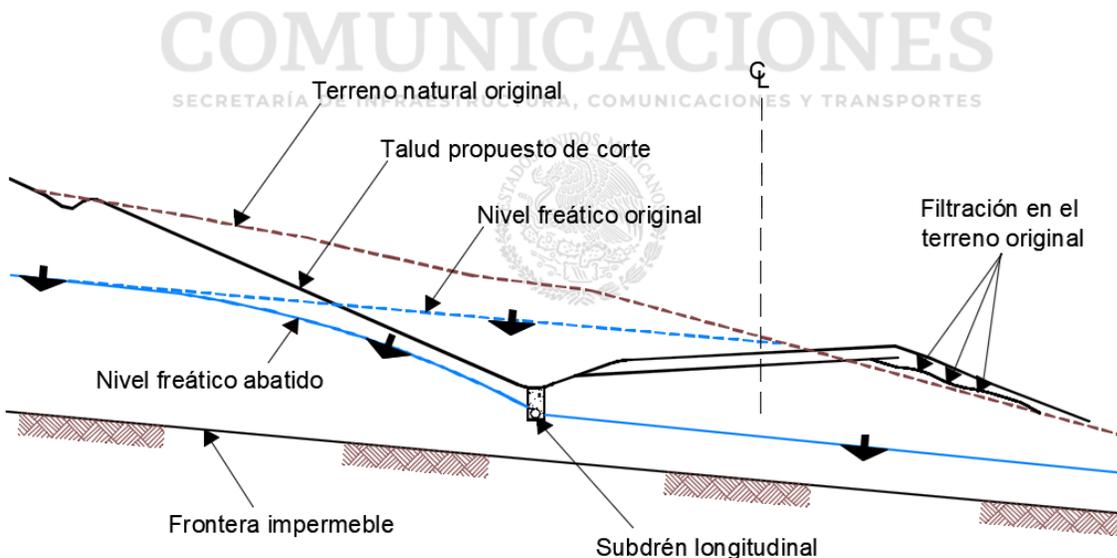


FIGURA 6.- Esquema de un subdrén longitudinal para cortar la filtración y abatir el nivel freático

#### F.1.1. Datos

- Coeficiente de permeabilidad,  $K_s$ , de  $1 \times 10^{-5}$  cm/s ( $1 \times 10^{-7}$  m/s).
- Frontera impermeable con pendiente,  $s$ , de 15 %.

**F.1.2.** De acuerdo con lo que se observa en la Figura 7 de este Manual, en la red de flujo del agua de filtración, trazada conforme a lo indicado en la Fracción E.1. de este Manual, el número de canales de flujo,  $N_f$ , es de 6 y el número de caídas de potencial,  $N_e$ , es de 28. Se aclara que, aunque en la red se tienen 7 canales de flujo, para el ejemplo sólo se consideran 6, en virtud de que el canal inferior no aporta agua al subdrén longitudinal.

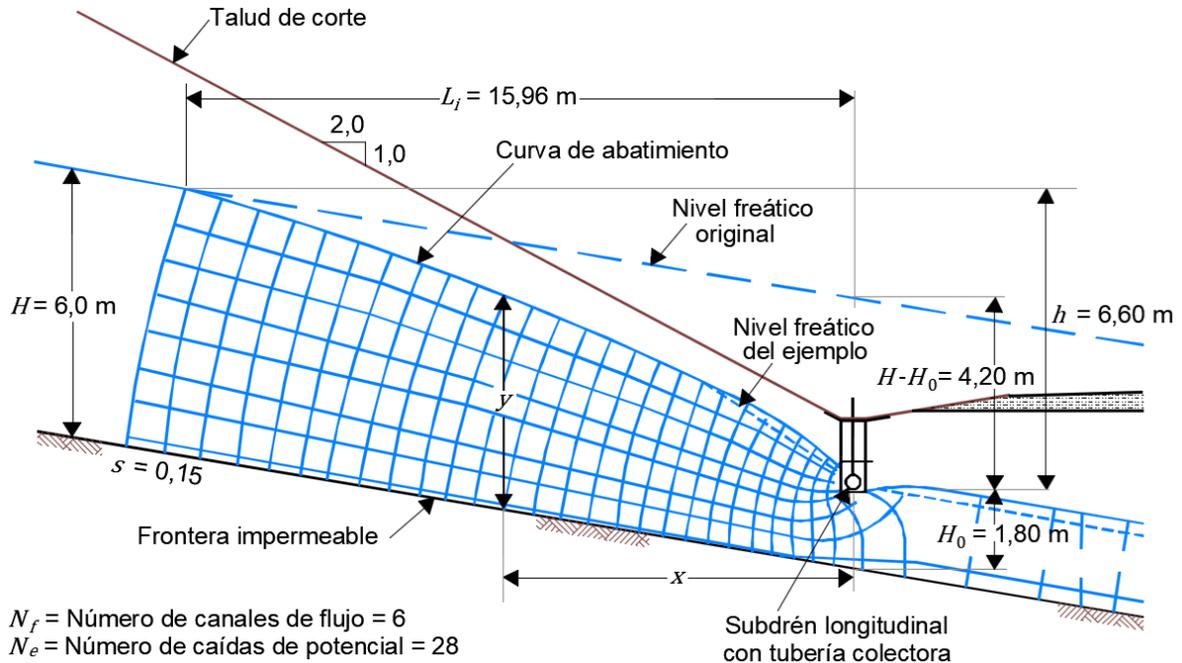


FIGURA 7.- Dimensiones del ejemplo de un subdrén longitudinal y detalles de la red de flujo

### F.1.3. Determinación del gasto de diseño

La determinación del gasto de diseño de este ejemplo se realiza mediante los siguientes pasos:

- Se establece la distancia a partir de la cual se comienza a abatir el nivel freático, denominada como radio de influencia, que se determina mediante la siguiente expresión,  $L_i$ , indicada en la Figura 7 de este Manual:

$$L_i = 3,8 \times (H - H_0)$$

Donde:

$L_i$  = Radio de influencia o distancia a partir de la cual se comienza a abatir el nivel freático, (m)

$H$  = Altura original del nivel freático sobre la frontera impermeable, (m)

$H_0$  = Altura entre el fondo de la capa permeable y la frontera impermeable, (m)

- Mediante la expresión anterior, se determina el radio de influencia del abatimiento del nivel freático por efecto de la colocación del subdrén longitudinal por proyectar:

$$L_i = 3,8 \times (6,0 - 1,8) = 15,96 \text{ m}$$

- Se determina la carga hidráulica total,  $h$ . Dado que la frontera impermeable tiene una pendiente de 15 %, la distancia vertical entre ella y la cota en donde empieza el abatimiento es:

$$h_v = H + (s \times L_i) = 6,0 + (0,15 \times 15,96) = 8,40 \text{ m}$$

Por lo tanto, la pérdida de carga hidráulica total,  $h$ , es:

$$h = h_v - H_0 = 8,40 - 1,80 = 6,60 \text{ m}$$

- Se determina el gasto de diseño con la expresión del Inciso E.1.3. de este Manual:

$$Q = K_s \times h \times \frac{N_f}{N_e} = (1 \times 10^{-7}) \times 6,60 \times \frac{6}{28} = 1,41 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} = 0,012 \text{ m}^3/\text{día}/\text{m}$$

Se aclara que, aunque el ejemplo anteriormente mostrado presenta una solución para el caso de un subdrén interceptor longitudinal simple, se tendrá en cuenta que la selección de la ubicación del subdrén implica aplicar un buen criterio profesional y puede requerir la ejecución de varios tanteos, en especial si el propósito del subdrén longitudinal es abatir el nivel freático y reducir las presiones de poro para alcanzar un determinado valor en el factor de seguridad del talud, así como impedir la saturación y el consecuente debilitamiento de la capa subrasante.

## F.2. APLICACIÓN EN LA INFILTRACIÓN DE UN PAVIMENTO

A continuación, se analiza un ejemplo para determinar el gasto de diseño,  $q_i$ , debido a la infiltración de agua en un pavimento rígido, ilustrado en la Figura 8 de este Manual, con la finalidad de diseñar una capa drenante aplicando los métodos de relación de infiltración y de infiltración a través de juntas y grietas, indicados en la Fracción E.2. de este Manual.

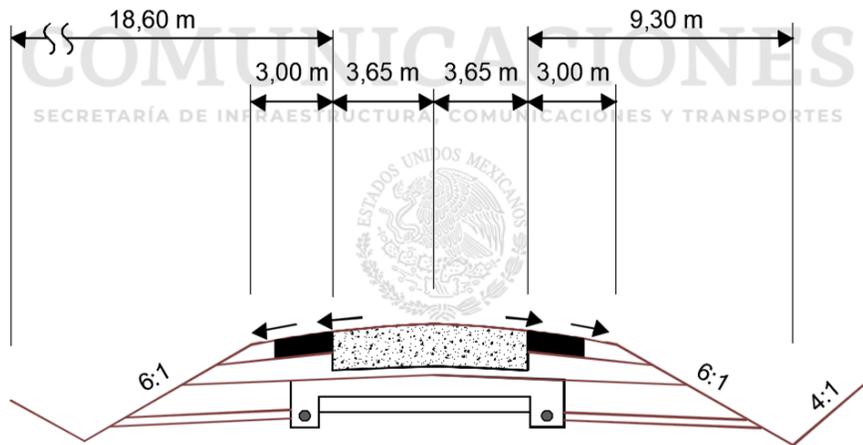


FIGURA 8.- Sección de la carretera para la determinación del gasto de diseño debido a infiltración de agua en el pavimento

### F.2.1. Aplicación del método de relación de infiltración

#### F.2.1.1. Datos

Para la determinación del gasto de diseño debido a infiltración de agua en el pavimento mediante el método de la relación de infiltración a que se refiere el Inciso F.2.1. de este Manual, se considera un volumen de lluvia,  $R$ , de 70 mm/h y una relación de infiltración en el pavimento,  $C$ , de 0,50.

**F.2.1.2.** El gasto de infiltración en el pavimento se determina mediante la expresión indicada en el Inciso E.2.1. de este Manual, que al considerar los datos anteriores se tiene que:

$$q_i = 0,024 \times C \times R = 0,024 \times 0,50 \times 70 = 0,84 \text{ m}^3/\text{día}/\text{m}^2$$

## F.2.2. Aplicación del método de infiltración a través de juntas y grietas

### F.2.2.1. Datos

Calzada con bombeo uniforme, de 2 carriles de 3,65 m cada uno, con acotamientos de 3 m a cada lado y un ancho de base permeable,  $W$ , igual al de la calzada. La longitud de las juntas que contribuyen,  $W_c$ , es de 7,3 m, ya que no se considera el acotamiento, con un espaciamiento promedio entre juntas transversales,  $C_s$ , de 6 m.

Dado que el número de carriles,  $N$ , con el mismo bombeo, que contribuyen a la infiltración, es igual a 2, el número de juntas longitudinales  $N_c$  es de:

$$N_c = N + 1 = 2 + 1 = 3$$

Referente a la tasa de infiltración en las grietas,  $I_c$ , se considera un valor de 0,22 m<sup>3</sup>/día/m de junta, de acuerdo con la recomendación indicada en el Párrafo E.2.2.1. de este Manual; mientras que la permeabilidad del pavimento sin juntas ni grietas,  $k_p$ , se considera igual a 0, de acuerdo con lo indicado en el Párrafo E.2.2.5.

### F.2.2.2. Solución

El gasto de infiltración en el pavimento a través de las grietas se determina mediante la expresión indicada en el Inciso E.2.2. de este Manual, que al considerar los datos anteriores se tiene:

$$q_i = I_c \times \left( \frac{N_c}{W} + \frac{W_c}{W \times C_s} \right) + k_p = 0,22 \times \left( \frac{3}{7,3} + \frac{7,3}{7,3 \times 6} \right) + 0 = 0,127 \text{ m}^3/\text{día}/\text{m}^2$$

### F.2.3. Conclusión

Se pueden apreciar diferencias notables entre los resultados obtenidos entre ambos métodos. El método de infiltración a través de juntas y grietas es más analítico y se basa en datos obtenidos en campo, por lo que su utilización es más frecuente; sin embargo, el método de relación de infiltración es útil para fines de comprobación. Si el Ingeniero proyectista lo estima conveniente, para fines de diseño podrá usar el mayor de los valores obtenidos entre ambos métodos.

## G. BIBLIOGRAFÍA

Instituto Nacional de Vías, República de Colombia (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras, Capítulo 5 Drenaje Subsuperficial*.

Federal Highway Administration (1990). TS-80-224. *Highway Subdrainage Design*. Estados Unidos de América.

Flores Berrones, R. (2000). *Flujo de Agua en Suelos*. Asociación Mexicana de Hidráulica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.

Universidad Nacional de Rosario (2010). *Filtraciones*. Escuela de Ingeniería Civil, Geología y Geotecnia.

# COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



**SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA**

Dirección General de Servicios Técnicos

Av. Coyoacán 1895

Col. Acacias, Benito Juárez, 03240

Ciudad de México

[www.gob.mx/sct](http://www.gob.mx/sct)