



Compagnie Nationale du Rhône

Compagnie Nationale du Rhône  
Direction Ingénierie Ouvrages Hydrauliques et Fluviaux  
I.00009.001 (CL04)

DI-OHF 07-814a

## Canal del Dique

# Nota de cálculos de las pantallas para-excavaciones y bombeos

### **Objeto:**

El objeto de este documento es presentar las hipótesis y los cálculos de dimensionamiento de las pantallas para-excavaciones sobre la esclusa y la obra de regulación del estrato, así como los dimensionamientos de los bombeos para disminuir el plano de agua y proyección del estrato.

Se presentan para cada cálculo las hipótesis de suelos, las hipótesis concernientes al estrato freático y las hipótesis relacionadas con el nivel de agua en el canal.

El dimensionamiento de las para-excavaciones se efectúa a partir de la regla de Lane y el de los bombeos a partir de la regla de Schneebelli.

En la conclusión, se propone un breve análisis de los resultados obtenidos en relación con el nivel de las hipótesis (optimista o pesimista).

## ÍNDICE

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>DIMENSIONAMIENTO DE LAS PANTALLAS PARA-EXCAVACIONES .....</b>          | <b>3</b>  |
| 1.1.      | RECUERDO DE LA REGLA DE LANE .....  | 3         |
| 1.2.      | HIPÓTESIS SOBRE LOS SUELOS .....  | 4         |
| 1.3.      | PANTALLAS DE LA OBRA DE REGULACIÓN .....                                  | 5         |
| 1.3.1.    | <i>Dimensiones y cotas de la obra .....</i>                               | <i>5</i>  |
| 1.3.2.    | <i>Aplicación de la regla de Lane .....</i>                               | <i>5</i>  |
| 1.3.3.    | <i>Conclusión .....</i>   | <i>6</i>  |
| 1.4.      | PANTALLAS DE LA ESCLUSA DE CALAMAR .....                                  | 7         |
| 1.4.1.    | <i>Dimensiones y cotas de la obra .....</i>                               | <i>7</i>  |
| 1.4.2.    | <i>Aplicación de la regla de Lane: función para-excavación .....</i>      | <i>8</i>  |
| 1.4.3.    | <i>Aplicación de la regla de Lane: función proyección de estrato.....</i> | <i>8</i>  |
| <b>2.</b> | <b>BOMBEOS .....</b>  | <b>9</b>  |
| 2.1.      | HIPÓTESIS DE SUELOS .....   | 9         |
| 2.2.      | HIPÓTESIS SOBRE LE ESTRATO FREÁTICO.....                                  | 10        |
| 2.3.      | ESCLUSA .....   | 10        |
| 2.3.1.    | <i>Disminución del plano de agua después de poner las estacadas.....</i>  | <i>10</i> |
| 2.3.2.    | <i>Percolación a través de las estacadas .....</i>                        | <i>11</i> |
| 2.3.3.    | <i>Disminución del estrato .....</i>                                      | <i>11</i> |
| 2.3.4.    | <i>Conclusión .....</i>   | <i>12</i> |
| 2.4.      | OBRA DE REGULACIÓN .....  | 12        |
| 2.4.1.    | <i>Disminución del estrato .....</i>                                      | <i>12</i> |
| 2.4.2.    | <i>Conclusión .....</i>   | <i>12</i> |

# 1. Dimensionamiento de las pantallas para-excavaciones

## 1.1. Recuerdo de la regla de Lane

El cálculo de riesgo de erosión interna se apoya en la formulación de LANE, quien compara el gradiente de desbordamiento ( $i$ ) que tiene en cuenta los recorridos horizontales y verticales del agua en el suelo con el gradiente crítico que depende del suelo ( $i_c$ ).

El valor  $i$  corresponde al gradiente del desbordamiento y la estabilidad de la obra con respecto al fenómeno de erosión interna está asegurado si la condición siguiente se verifica.

- o  $i < i_c$  o incluso  $L_v + 1/3 L_h > c H$

Los tamaños utilizados se precisan en la siguiente tabla :

| Símbolo | Significado   |
|---------|---|
| $i$     | Gradiente del desbordamiento alrededor de la obra               |
| $i_c$   | Gradiente crítico del suelo                                     |
| $c$     | Constante de Lane – Inverso del gradiente crítico $c = 1 / i_c$ |
| $L_v$   | Longitud de los recorridos verticales del desbordamiento        |
| $L_h$   | Longitud de los recorridos horizontales del desbordamiento      |
| $H$     | Carga hidráulica sobre la obra                                  |

En la bibliografía a menudo se utiliza el parámetro  $c = 1 / i_c$ , inverso del gradiente crítico del suelo considerado. Se han establecido los valores siguientes del parámetro  $c$ , en función del tipo de suelo:

| Naturaleza del suelo             | Valor del parámetro $c$<br>Corresponde a $1/i_c$ |
|----------------------------------|--|
| arenas finas y limos             | 8.5  |
| arenas finas / arenas limosas    | 7  |
| arenas medias                    | 6  |
| arenas burdas                    | 5  |
| gravas finas                     | 4  |
| gravas medias                    | 3 à 3.5  |
| Arcilla blanda / Arcilla arenosa | 3  |
| Arcilla media                    | 2  |
| Arcilla rígida / duras           | 1.8  |
| Arcilla muy rígida               | 1.6  |

Se puede interpretar esta tabla diciendo que los elementos finos no coherentes son acarreados más fácilmente que los elementos más burdos, mientras que la cohesión permite una resistencia al acarreo de granos aún más grandes.

## 1.2. Hipótesis sobre los suelos

Los datos de los suelos provienen de reconocimientos geotécnicos en Puerto Niño (orilla derecha del Magdalena, aproximadamente a 2 km del sitio del proyecto) y de reconocimientos geofísicos sobre la isla de La Loca, así como en la orilla izquierda del Magdalena (costado Calamar). Las hipótesis que se deducen a partir de estos datos son las siguientes:

| Profundidad                                    | Tipo de suelo    | Cohesión              | Phi                 | gamma                | % de finas < 75 $\mu$ m |
|--|------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| De TN a 10 a 16 m de profundidad               | Limos arcillosos | No disponible         | No disponible       | 19 KN/m <sup>3</sup> | De 55 a 98 %            |
| De la capa superior (10-16 m) al substrato (?) | arenas limosas   | Aproximadamente 2 KPa | Aproximadamente 30° | 19 KN/m <sup>3</sup> | De 1 a 20 %             |

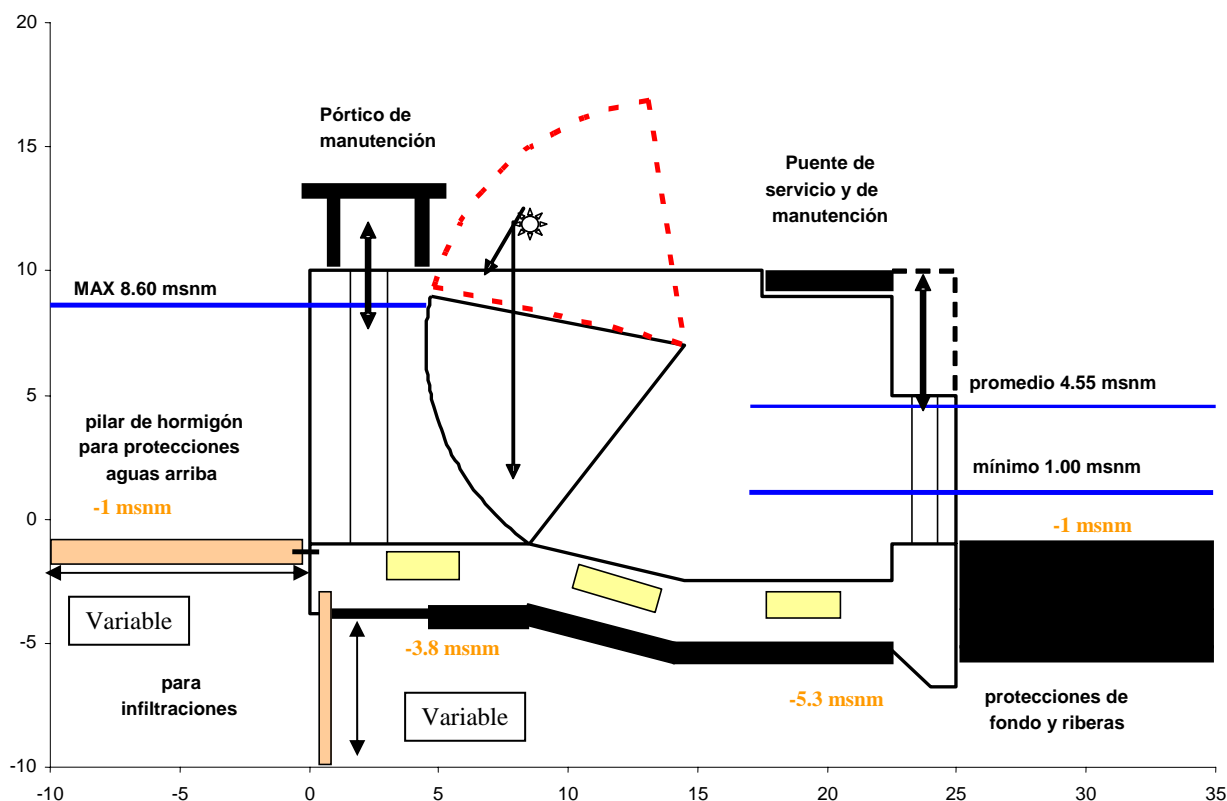
Las obras estarán cimentadas a priori en los limos arcillosos de superficie. Dado el porcentaje de finos que éstas comportan, es difícil establecer si presentan cierta cohesión o no. En otras palabras, no hay correlación simple entre granulometría y cohesión. Así, se puede decir que la constante de Lane de este suelo se sitúa alrededor del valor 3, o alrededor del valor 7.

Lo mismo vale para las arenas limosas subyacentes.

No se tienen indicaciones precisas sobre la posición del substrato, porque aparentemente éste no ha sido encontrado en los sondeos efectuados a 45 m de profundidad, en la orilla derecha del Magdalena, ni en el curso de los sondeos geofísicos, cuya profundidad de interpretación es del orden de 20 m.

### 1.3. Pantallas de la obra de regulación

#### 1.3.1. Dimensiones y cotas de la obra



El esquema anterior indica las dimensiones de la obra. El recorrido horizontal seguido por el desbordamiento es función de la longitud de la obra (25 m) y de la del pilar aguas arriba. El recorrido vertical es función de la profundidad de la cortina para-excavación y de las cotas de cimientos de la obra. La carga hidráulica considerada es la carga máxima (cota del plano de agua aguas arriba (8.60) msnm y cota aguas abajo (1.00) msnm). Se presenta una situación similar con el plano de agua aguas arriba a (9.70) msnm (nivel de la crecida milenaria), pero estando el enrasamiento de las compuertas a (8.60) msnm, el nivel correspondiente aguas abajo no sería (1.00), sino más bien (2.20) msnm aproximadamente. Se conserva entonces el par (8.60) aguas arriba – (1.00) aguas abajo.

#### 1.3.2. Aplicación de la regla de Lane

En la siguiente tabla se presenta el valor del gradiente hidráulico por comparar con la constante de Lane para diferentes longitudes del pilar aguas arriba y las profundidades de la cortina para-excavación:

Nivel PE aguas arriba: (8.60) msnm  
Nivel pilar aguas arriba: (-1.00) msnm  
Espesor pilar aguas arriba: 0.50 m  
Nivel cimientos pilar aguas abajo: (-5.30) msnm  
Longitud obra: 25 m  
Nivel PE aguas abajo: (1.00) msnm

El recorrido horizontal corresponde a la longitud de la obra más la longitud del pilar aguas arriba. El recorrido vertical seguido por el desbordamiento corresponde a la longitud recorrida por el desbordamiento al descender para obtener la cota inferior de la cortina para-excavación desde el nivel del pilar aguas arriba más la longitud al subir para obtener el nivel de los cimientos del pilar aguas abajo.

| <b>Dimensiones cortina y pilar aguas arriba y Cálculo del gradiente hidráulico</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Profundidad de la pantalla hermética (m)</b>                                    | 10          | 15          | 15          | 18          | 20          | 20          | 22          | 25          |
| <b>Longitud pilar aguas arriba (m)</b>   | 10          | 15          | 20          | 20          | 20          | 25          | 25          | 25          |
| <b>Recorrido horizontal Lv (m)</b>   | 35          | 40          | 45          | 45          | 45          | 50          | 50          | 50          |
| <b>Recorrido vertical (m)</b>  | 16.7        | 26.7        | 26.7        | 32.7        | 36.7        | 36.7        | 40.7        | 46.7        |
| <b>Carga hidráulica (m)</b>  | 8.8         | 8.8         | 8.8         | 8.8         | 8.8         | 8.8         | 8.8         | 8.8         |
| <b>Gradiente hidráulico</b>  | <b>3.73</b> | <b>5.27</b> | <b>5.49</b> | <b>6.28</b> | <b>6.80</b> | <b>7.02</b> | <b>7.55</b> | <b>8.34</b> |

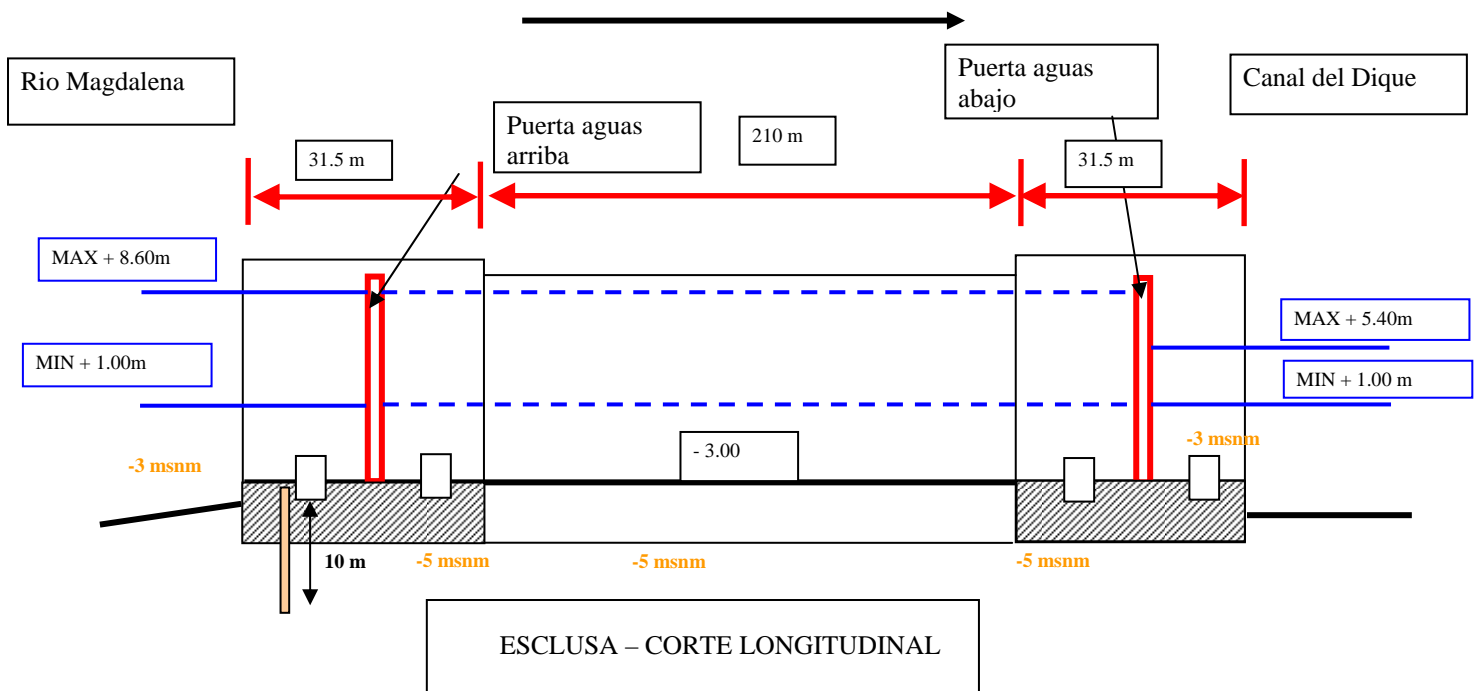
### 1.3.3. Conclusión

Si se toma la hipótesis optimista para los suelos, una cortina para-excavación de profundidad del orden de 10 metros, asociada a un pilar de longitud aproximada de 10 metros, debería ser suficiente para evitar los problemas de erosión interna y de fisuras.

Al considerar las hipótesis pesimistas, la profundidad de la cortina debería ser del orden de 20 a 25 metros y la longitud del pilar debería ser igualmente del orden de 25 metros.

## 1.4. Pantallas de la esclusa de Calamar

### 1.4.1. Dimensiones y cotas de la obra



El esquema anterior indica las dimensiones de la obra. El recorrido horizontal seguido por el desbordamiento es función de la longitud de la obra (273 m). El recorrido vertical es función de la profundidad de la cortina para-excavación y de las cotas de cimientos de la obra. La carga hidráulica considerada es la carga máxima (cota del plano de agua aguas arriba (8.60) msnm y cota aguas abajo (1.00) msnm). Así como para la obra de regulación, se puede tener el nivel (9.70) msnm aguas arriba pero con un nivel (2.20) msnm aproximadamente aguas abajo, lo que es equivalente en este tipo de cálculo.

### 1.4.2. Aplicación de la regla de Lane: función para-excavación

En la siguiente tabla se presenta el valor del gradiente hidráulico por comparar con la constante de Lane para diferentes longitudes del pilar aguas arriba y las profundidades de la cortina para-excavación:

Nivel PE aguas arriba : (8.60) msnm

Nivel pilares cabezales y cámaras de la esclusa: (-3.00) msnm

Espesor de los pilares: 2 m

Longitud obra: 273 m

Nivel PE aguas abajo: (1.00) msnm

| <b>Dimensiones cortina – Cálculo de gradiente hidráulico</b> |              |              |
|--|--------------|--------------|
| <b>Profundidad de la pantalla hermética (m)</b>              | 0            | 10           |
| <b>Recorrido horizontal <math>L_v</math> (m)</b>             | 273          | 273          |
| <b>Recorrido vertical (m)</b>                                | 4.0          | 24.0         |
| <b>Carga hidráulica (m)</b>                                  | 8.8          | 8.8          |
| <b>Gradiente hidráulico</b>                                  | <b>12.50</b> | <b>15.13</b> |

Cualquiera que sean las hipótesis que se manejan sobre los suelos, las dimensiones de la obra permiten descartar el riesgo de erosión interna y de fisuras, incluso sin cortina para-excavación.

Sin embargo, las cortinas laterales serán necesarias para evitar los contorneados laterales de la obra (así como dispositivos de drenaje a lo largo de los muros de contención y bajo la esclusa).

### 1.4.3. Aplicación de la regla de Lane: función proyección de estrato

El dimensionamiento de la esclusa y los cálculos de estabilidad han mostrado que un nivel de estrato muy elevado inducía sub-presiones muy fuertes y que la esclusa tenía riesgo de « flotar » en ciertas condiciones. Según los cálculos de estabilidad de la esclusa, el nivel crítico calculado para el estrato freático está en la cota (2.50) msnm. Se prevén dispositivos para poder disminuir el nivel freático a este nivel en los terraplenes de la esclusa cuando se prevea una operación de mantenimiento que requiera dicha disminución.

Así, se requiere una cortina para-excavación y cortinas laterales para crear una pérdida de carga entre el nivel aguas arriba y el nivel del estrato en los terraplenes alrededor de la esclusa.

Se ha calculado con la regla de Lane la profundidad de la cortina necesaria para el gradiente hidráulico creado por la pérdida de carga (nivel máx. aguas arriba, o sea (8.60) msnm menos nivel del estrato en los terraplenes, o sea (2.50) msnm) precisamente detrás de la cortina sea inferior al gradiente crítico.

Los resultados se presentan a continuación:

Nivel PE aguas arriba: (8.60) msnm

Nivel pilares cabezales y cámaras de la esclusa: (-3.00) msnm

Espesor de los pilares: 2 m

Longitud obra: 2 m

Nivel estrato: (2.50) msnm

| Dimensiones cortina – Cálculo de gradiente hidráulico |      |      |      |
|---|------|------|------|
| Profundidad de la pantalla hermética (m)              | 0    | 10   | 15   |
| Recorrido horizontal $L_v$ (m)                        | 2    | 2    | 2    |
| Recorrido vertical (m)                                | 22.3 | 42.3 | 52.3 |
| Carga hidráulica (m)                                  | 7.3  | 7.3  | 7.3  |
| Gradiente hidráulico                                  | 3.57 | 6.85 | 8.49 |

Si se toma la hipótesis optimista para los suelos, no es necesario prever cortina para evitar los problemas de erosión internos debido al gradiente hidráulico creado por el mantenimiento del estrato en los terraplenes en (2.50) msnm.

Considerando las hipótesis pesimistas, la profundidad de la cortina debería ser del orden de 10 a 15 metros.

## 2. Bombeos

### 2.1. Hipótesis de suelos

No se dispone de ninguna medición directa sobre la permeabilidad de los suelos. Se formulan las hipótesis a partir de elementos suministrados por la campaña geotécnica de Puerto Niño (recuerdo: reconocimientos realizados en la orilla derecha del Río Magdalena a 2 km del sitio de nuestro proyecto) :

La fórmula empírica de Hazen (1895) permite correlacionar, en los suelos arenosos, la granulometría y la permeabilidad del suelo. Así, a partir de esta fórmula y de las curvas granulométricas establecidas en los suelos Puerto Niño, se pueden estimar las permeabilidades probables de los suelos a nivel de Calamar:

En las arenas limosas de cimentación de las obras:

$$k = \text{entre } 10^{-3} \text{ y } 10^{-5} \text{ m/s}$$

En el núcleo limoso de las estacadas de la excavación de la esclusa realizadas con los materiales del lugar :

$$k = 10^{-4} \text{ y } 10^{-6} \text{ m/s}$$

## 2.2. Hipótesis sobre le estrato freático

Ante la ausencia de datos, el nivel del estrato freático considerado es el nivel correspondiente al nivel promedio en el Magdalena, o sea (5.00) msnm. Este nivel promedio no corresponde a la situación más crítica que verá la obra teniendo en cuenta su duración.

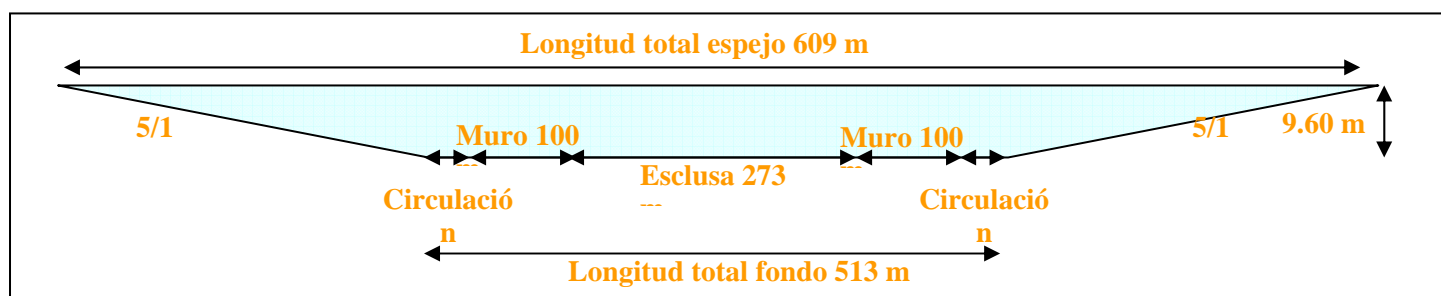
## 2.3. Esclusa

### 2.3.1. Disminución del plano de agua después de poner las estacadas

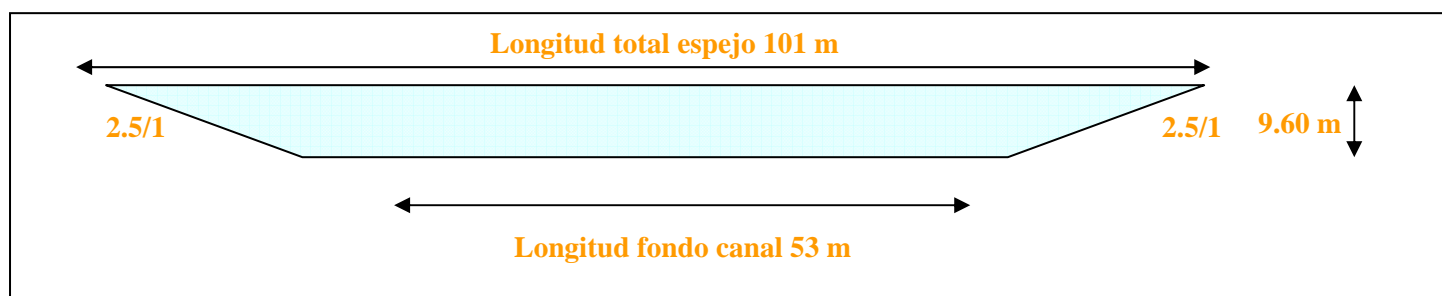
La hipótesis formulada para la velocidad de disminución del plano de agua es de **13 cm / hora**. Esta hipótesis será validada a partir de los datos más precisos relacionados con las barcas del canal y su estabilidad.

La hipótesis formulada para la cota del plano de agua es de (8.60) msnm (correspondiente al nivel de la crecida decenal).

Las dimensiones de la cuenca a vaciar están precisadas sobre los siguientes dos cortes longitudinal y transversal.



Corte longitudinal



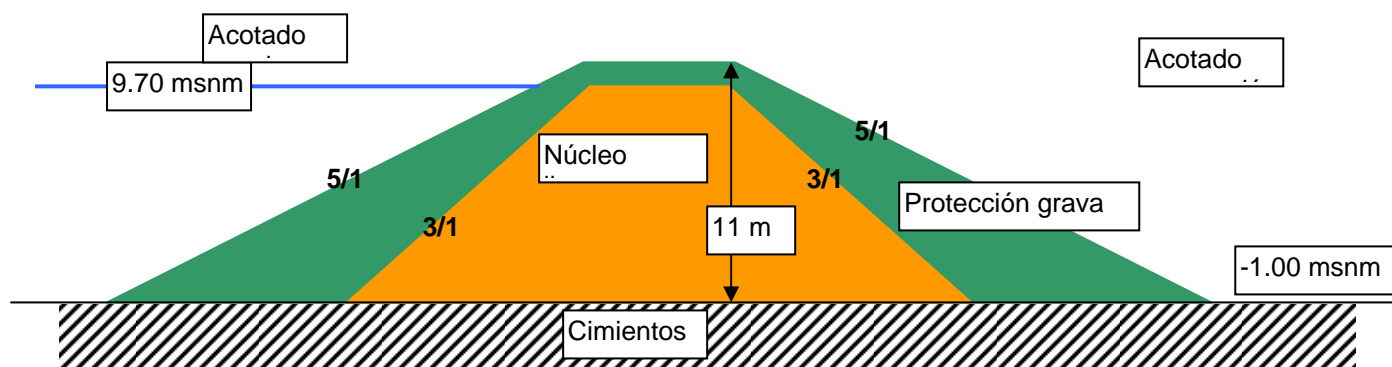
Corte transversal

En estas condiciones, el volumen total a bombear es aproximadamente 400,000 m<sup>3</sup>.

El tiempo de bombeo respetando la velocidad propuesta es aproximadamente **74 horas** con un caudal máximo aproximado de 7,300 m<sup>3</sup>/h y un caudal promedio de 5,600 m<sup>3</sup>/h aproximadamente.

### 2.3.2. Percolación a través de las estacadas

La geometría de la estacada es la siguiente:



Se recuerda que la permeabilidad de la estacada se toma igual a  $10^{-4}$  m/s y la de los cimientos a  $10^{-3}$  m/s en el caso de hipótesis de fuerte permeabilidad, y  $10^{-6}$  m/s et  $10^{-5}$  m/s en caso de hipótesis de leve permeabilidad. El espesor de los cimientos se toma igual a 50 m (no hay datos sobre el substrato en los sondeos a 45 m de profundidad).

Teniendo en cuenta estas características, mediante la aplicación de las reglas de Shneebelli, el caudal de percolación a través de la estacada se estima en aproximadamente  $900 \text{ m}^3/\text{h}$  en el caso de fuertes permeabilidades de los suelos, y  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  en la hipótesis de leves permeabilidades.

EL caudal por bombear en la excavación de la esclusa que proviene de las aguas de percolación a través de las estacadas aguas arriba y aguas abajo estará comprendido **entre 20 y 1800  $\text{m}^3/\text{h}$**  aproximadamente, en caso de aguas altas. En aras de la seguridad, se preverá el caso de las aguas altas sobre toda la duración de la obra (o sea cerca de 130 días).

### 2.3.3. Disminución del estrato

El estrato debe ser rebajado en la excavación de la esclusa de la cota (-1.00) msnm (fondo del canal) a la cota (-6.00) msnm (un metro debajo de la cota de asiento del pilar de la esclusa). El radio de disco equivalente de la excavación a desecar se toma igual a 93 m (radio de disco equivalente a la superficie de la excavación en la cota (-1.00) msnm).

La permeabilidad de las arenas limosas de los cimientos está comprendida entre  $10^{-3}$  y  $10^{-5}$  m/s. El substrato está ubicado en la cota (-50.00) msnm. El nivel normal del estrato en esta zona se toma igual a (-1.00) msnm (fondo del canal).

En estas condiciones, el caudal por bombear para rebajar el estrato 5 m está comprendido **entre 130 y 2,900  $\text{m}^3/\text{h}$** , durante toda la duración de la obra.

### 2.3.4. Conclusión

**Durante la fase de disminución del plano**, cuya duración se estima en cerca de 74 horas, un bombeo de aproximadamente **6 000 a 7 500 m<sup>3</sup>/h** será necesario.

**Durante la fase de los trabajos** (nivelación de la excavación y construcción de la esclusa), un bombeo **comprendido entre 150 y 4,700 m<sup>3</sup>/h** será necesario.

Deberá llevarse a cabo, en estudios posteriores, una verificación de la tenuta de los suelos en su lugar, sometidos al gradiente hidráulico provocado por el rebajamiento del estrato.

## 2.4. *Obra de regulación*

### 2.4.1. Disminución del estrato

EL estrato debe rebajarse en la excavación de la obra de regulación de la cota (5.00) msnm (nivel promedio del estrato mantenido) a la cota (-6.00) msnm (aproximadamente un metro por debajo de la cota de asiento del pilar). El radio de disco equivalente de la excavación a desecar se toma igual a 40 m (radio de disco equivalente a la superficie de la excavación 70 m x 70 m en la cota (-6.00) msnm).

La permeabilidad de las arenas limosas de cimientos está comprendida entre  $10^{-3}$  y  $10^{-5}$  m/s. El substrato está ubicado en la cota (-50.00) msnm.

El nivel promedio del estrato en esta zona se toma igual a (5.00) msnm.

En estas condiciones, el caudal por bombear para rebajar el estrato de 5 m está **comprendido entre 100 y 3,700 m<sup>3</sup>/h**, durante toda la duración de la obra.

### 2.4.2. Conclusión

**Durante la fase de los trabajos** (nivelaciones de la excavación y construcción de la esclusa), un bombeo **comprendido entre 100 y 3,700 m<sup>3</sup>/h** será necesario.

Deberá llevarse a cabo en estudios posteriores una verificación de la tenuta de los suelos en su lugar, sometidos al gradiente hidráulico provocado por el rebajamiento del estrato.