



*Compagnie Nationale du Rhône*

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

## **Canal del Dique**

**Nota de cálculos de dimensionamiento de las compuertas  
de la obra de regulación**

**CALAMAR**

---

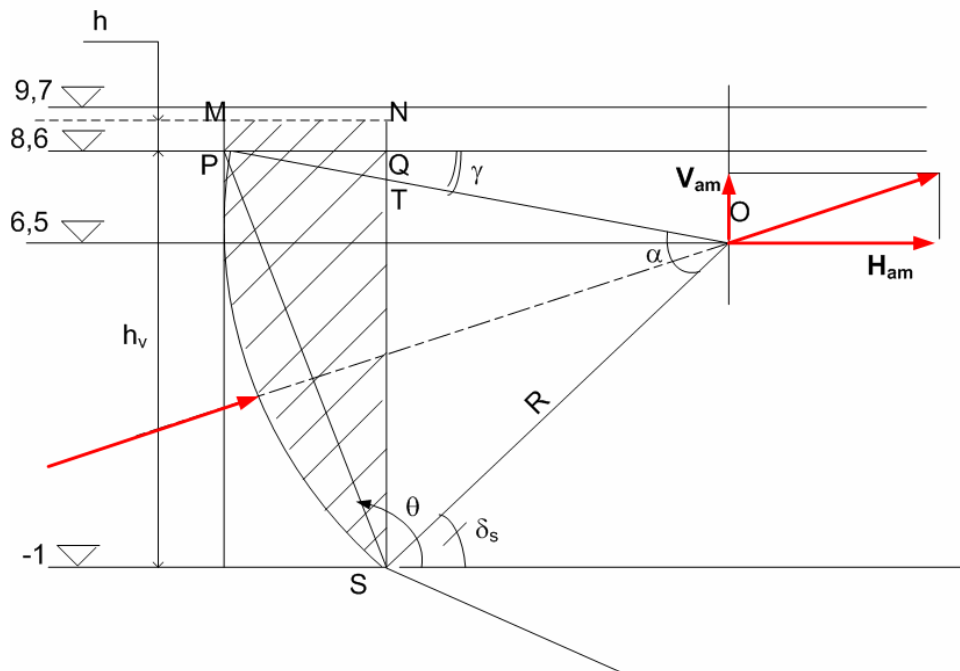
## ÍNDICE

---

1.	Esfuerzos hidráulicos compuerta cerrada :	3
1.1.	Empuje aguas arriba	3
1.2.	Empuje aguas abajo	4
1.3.	Empuje resultante	5
2.	Esfuerzos aplicados a las compuertas cerradas	6
3.	Esfuerzos de maniobra	11

## 1. ESFUERZOS HIDRÁULICOS COMPUERTA CERRADA :

### 1.1. Empuje aguas arriba



*Figura 1 : Modelización del empuje aguas arriba sobre la compuerta*

#### 1.1.1 **Componente horizontal $H_{am}$**

$H_{am} = w L_v(h+h_v/2)h_v$  con :

- $h_v$  : la altura de la compuerta ( $h_v = 9.6$  m)
- $h$  : altura del vertimiento por encima ( $h_{max} = 9.7 - 8.6 = 1.1$  m)
- $L_v$  : longitud del ribete de la compuerta (aproximadamente igual a 20 m)

Para simplificación y teniendo en cuenta la débil altura del vertimiento, la presión aguas arriba sobre el ribete es considerada hidrostática sobre toda su altura

#### 1.1.2 **Componente vertical $V_{am}$**

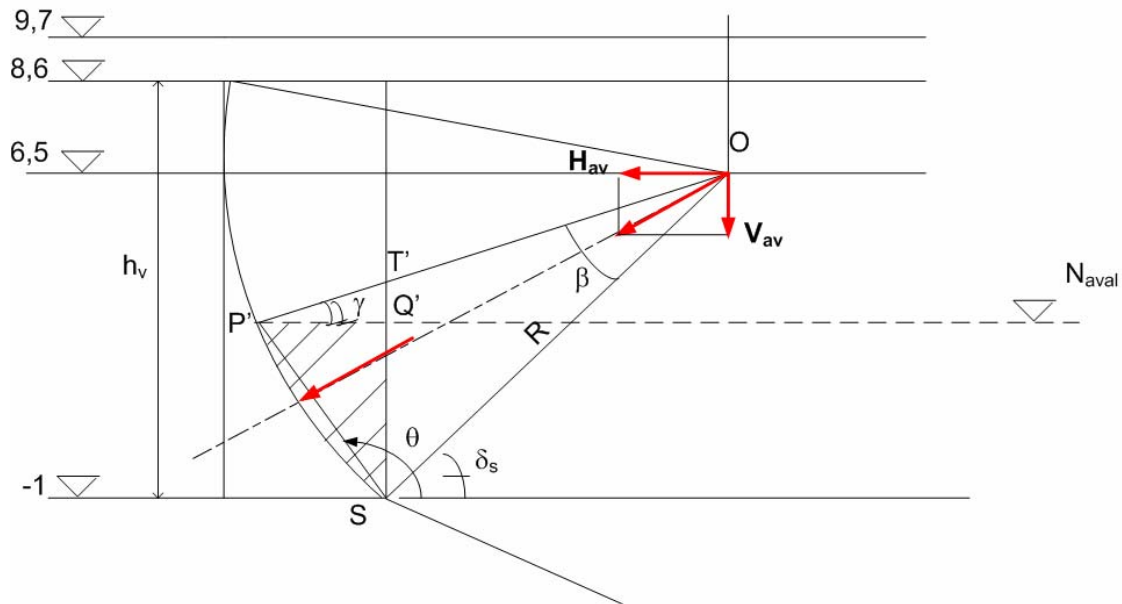
Denominando  $A_{am}$  el área de la superficie plana SPMN delimitada por el ribete SP, el segmento MN y las rectas verticales MP y NS, se tiene:

$$A_{am} = \alpha R^2 / 2 - \text{área OTS} + \text{área PTQ} + \text{área PMNQ}$$

y el empuje vertical es igual al peso del agua contenido en el volumen de sección  $A_{am}$  y de longitud igual a  $L_v$  :

$$V_{am} = w L_v A_{am}$$

## 1.2. Empuje aguas abajo



*Figura 2: Modelización del empuje aguas abajo sobre la compuerta*

### Componente horizontal $H_{av}$

$$H_{av} = w L_v h_{av}/2 h_{av}$$

### Componente vertical $V_{av}$

Denominando  $A_{av}$  el área de la superficie  $SP'Q'$  delimitada por la parte  $SP'$  del ribete húmedo aguas abajo, la porción de la superficie libre aguas abajo  $P'Q'$  y la recta vertical  $Q'S$ , se tiene :

$$A_{av} = \beta R^2/2 - \text{área } OT'S - \text{área } P'Q'T'$$

y el empuje vertical es igual al peso del agua contenido en el volumen de sección  $A_{av}$  y de longitud igual a  $L_v$  :

$$V_{av} = w L_v A_{av}$$

### 1.3. Empuje resultante

El empuje hidrostático resultante  $F_h$  tiene por componentes :

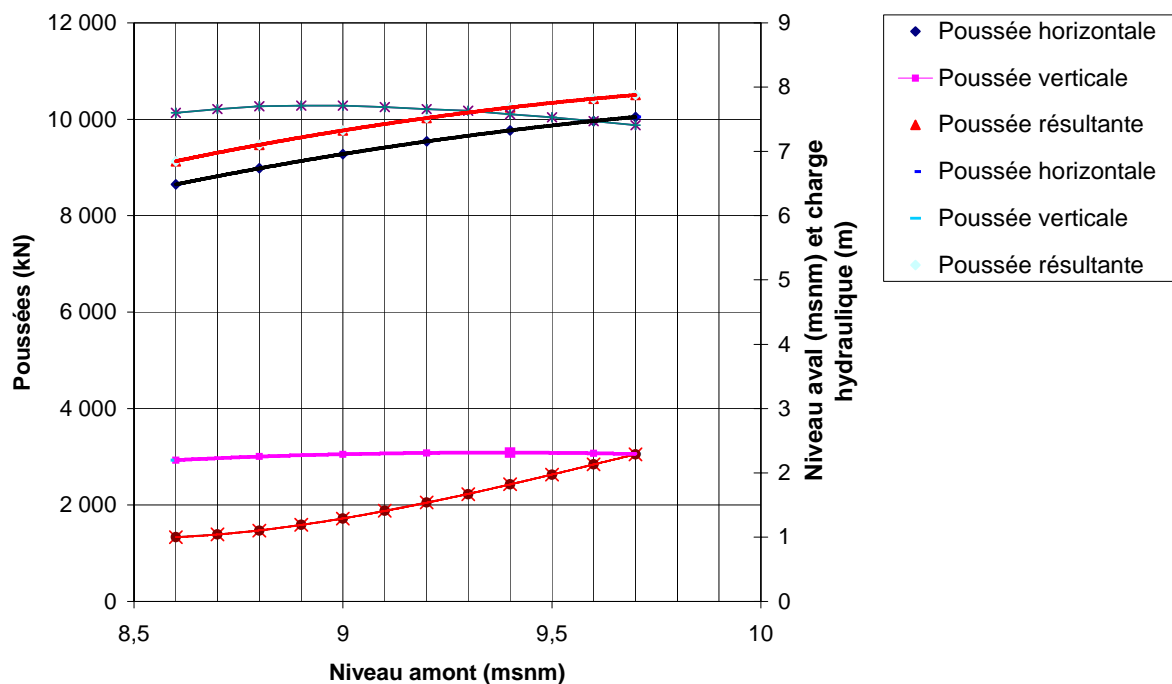
$$H = H_{am} - H_{av}$$

$$V = V_{am} - V_{av}$$

El siguiente gráfico indica las variaciones cuando el nivel del aguas arriba pasa de 8.6 a 9.7 m

- del empuje resultante
- de sus componentes horizontal y vertical
- del nivel aguas abajo
- de la cara hidráulica sobre la compuerta (nivel aguas arriba – nivel aguas abajo)

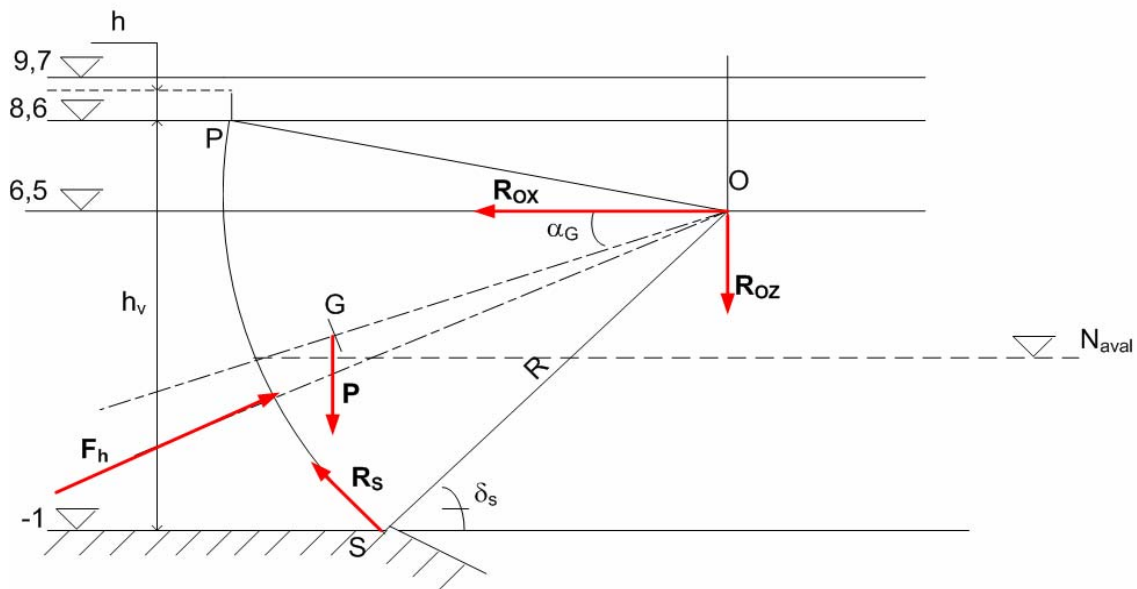
Estos resultados han sido obtenidos con una programación bajo Matlab.



El valor máximo del empuje resultante es :  $[F_h]_{m\acute{a}x} = 10\,500\text{ kN}$

El ángulo del empuje resultante encima de la horizontal decrece de 18,7 a 16,9° cuando el nivel aguas arriba pasa de 8.6 a 9.7 m

## 2. ESFUERZOS APLICADOS A LAS COMPUERTAS CERRADAS



*Figura 3 : Representación de los esfuerzos exteriores aplicados a la compuerta*

Las fuerzas exteriores que se ejercen sobre la compuerta cerrada son :

- el peso **P**
- el empuje hidrostático de resultante **F<sub>h</sub> = H + V**
- la reacción del umbral **R<sub>s</sub>**
- las reacciones de las articulaciones de resultante **R<sub>O</sub> = R<sub>Ox</sub> + R<sub>Oz</sub>**

Todas estas fuerzas están situadas en el plano mediano de la compuerta. **F<sub>h</sub>** y **R<sub>O</sub>** pasan por el punto O que une las dos articulaciones

Para la primera aproximación, el centro de gravedad G está supuestamente situado sobre la bisectriz del segmento angular de la compuerta a una distancia escogida a título indicativo  $r_G = 9,3$  m del centro del ribete (el centro de gravedad está siempre situado cerca del ribete teniendo en cuenta la importancia estructural de éste y de sus tensores).

La reacción **R<sub>s</sub>** del umbral se obtiene a partir del peso **P** de la compuerta sumergida escribiendo el momento resultante en el punto O, es nulo :  $R_s = \frac{P \cos \alpha_G \cdot OG}{R}$

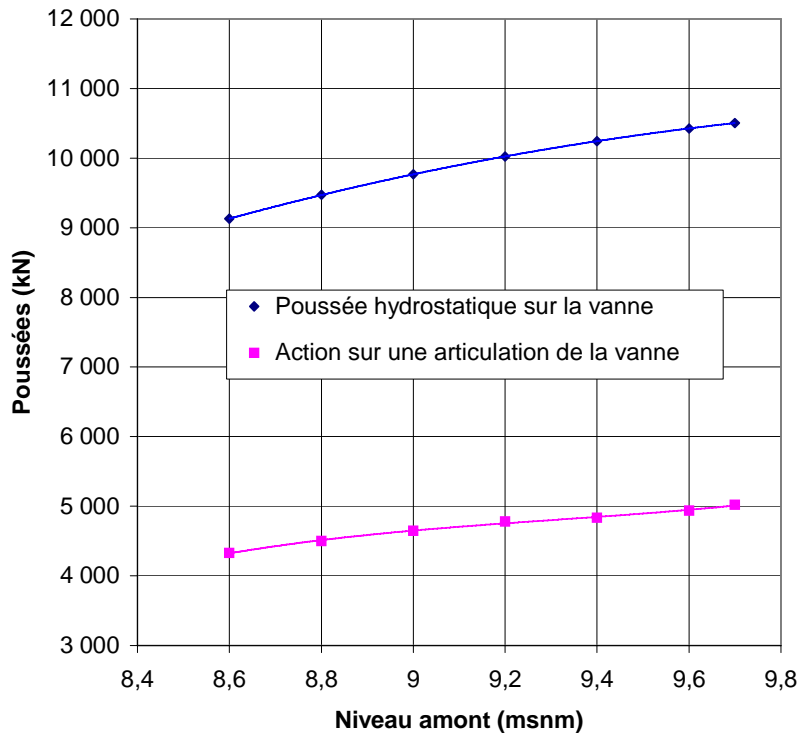
La reacción **R<sub>Oi</sub>** de una articulación tiene por componentes :

$$R_{O_i x} = \frac{1}{2} (H - R_s \sin \delta_s)$$

$$R_{O_i z} = \frac{1}{2} (V - P_a + R_s \cos \delta_s)$$

y su módulo vale :  $R_{O_i} = (R_{O_i x}^2 + R_{O_i z}^2)^{0,5}$

En el siguiente gráfico se muestran las evoluciones lineales del empuje y de la reacción de una articulación cuando el nivel aguas arriba varía de 8.6 a 9.7 m



```

%Programa inicia: cálculo de empujes sobre la compuerta cerrada

%altura compuerta entre umbral y enrasamiento (m)
hv=9.6;
% Nivel aguas arriba máx(m)
Namax=9.7;
%Nivel umbral (m)
Ns=-1;
% Nivel aguas arriba mín para vertimiento (m)
Namin=hv+Ns;

%Peso volúmico del agua (N/m3)
g=9.81;
w=9810;

pi=3.1416;

%altura vertimiento(m)
hmax=Namax-Namin;
hmin=0;
pash=0.1;
Nam=Namin:pash:Namax;
h=Nam-Namin;
%altura del agua aguas arriba
ham=hv+h;
%Anchura de paso (m)
L=18;

%Geometría de la compuerta
%Anchura de la compuerta (m)
Lv=20;
%Costado del centro del ribete % umbral de la compuerta(m)
zO=7.50;
%Abscisa enrasamiento de la compuerta % centro del ribete (m)
xP=11;

%Radio del ribete
R=((zO-hv)^2+xP^2)^0.5
%Abscisa enrasamiento de la compuerta % centro del ribete (m)
xS=(xP^2+hv*(hv-2*zO))^0.5

%Ángulo entre derecha contigua al umbral en el centro del ribete y horiz
(rad)
deltas=asin(zO/R);
%Ángulo entre derecha contigua al enrasamiento en el centro del ribete y
horiz (rad)
gamma=asin(abs(zO-hv)/R);

%Apertura angular de la compuerta entre el umbral y el enrasamiento (rad)
if zO < hv
    alfa=deltas+gamma;
else
    alfa=deltas-gamma;
end

%cálculo de los componentes del empuje aguas arriba (kN)
teta=deltas+(pi-alfa)/2;
r=2*R*cos(teta-deltas);
PQ=abs(r*cos(pi-teta))
TQ=PQ*tan(gamma)

```

```

A1=1/2*PQ*TQ
A2=1/2*R*(hv+TQ)*cos(deltas)

if z0 < hv
    Aam = alfa*R^2/2 + A1 - A2 + PQ*h;
else
    Aam = alfa*R^2/2 + A1 - A2 + PQ*h;
end

%Empuje vertical aguas arriba
Vam = w*Lv*Aam*1e-3;
%Empuje horizontal aguas arriba
Ham = w*Lv*(h+hv/2)*hv*1e-3;

%Caudal de desborde para una compuerta (m3/s)
Qu = 0.45*L*(2*g)^0.5*h.^1.5;
%Caudal total en canal (m3/s)
Q = 3*Qu
%Cálculo del nivel aguas abajo
Nav = -3.8336*(Q/1000).^2 + 10.894*(Q/1000) + 1.00
%Nav=0
%Altura del agua aguas abajo
hav=Nav-Ns;
%Carga hidráulica
hy=ham-hav;

%Cálculo de los componentes de empuje aguas abajo
%Cálculo del ángulo entre radio definido por nivel aguas abajo et
horizontal
gammav=asin(sin(deltas)-hav/R);
betav=deltas-gammav;
tetav=deltas+(pi-betav)/2;
rv=2*R*cos(tetav-deltas);
PvQv=abs(rv.*cos(tetav));
QvTv=PvQv.*tan(gammav);
STv=QvTv+hav;
TvJv=STv.*cos(deltas);

%Cálculo del empuje vertical aguas abajo
Aav = betav*R^2/2 - R*TvJv/2 - PvQv.*QvTv/2;
Vav = w*Lv*Aav*1e-3;

%Cálculo del empuje horizontal aguas abajo (kN)
Hav = w*Lv*hav/2.*hav*1e-3;

%Cálculo de los componentes del empuje resultante (kN)
H=Ham-Hav
V=Vam-Vav
Res=(H.^2+V.^2).^0.5
alfres=atan(V./H)/pi*180

%Cálculo del punto de aplicación del empuje resultante
deltar=atan(V./H);
tetar=deltas+(pi-(deltas-deltar))/2;
ra=2*R*cos(tetar-deltas);
za=ra.*sin(tetar);

%Peso de la compuerta(kN)
P=0.698*(L^2*hv*(Namax-Ns))^0.673;

```

```

%Coordenadas polares de cdg de la compuerta (origen de referencia: centro
ribete)
  %Radio (m)
    rG=9.32
  %Ángulo (rad)
    alfaG=26.5/180*pi

%Reacción del umbral (kN)
  Rs=P*cos(alfaG)*rG/R;

%Reacción de una articulación
  %Componente horizontal(kN)
    ROx=(H-Rs*sin(deltas))/2;
  %Componente vertical(kN)
    ROz=(V-P+Rs*cos(deltas))/2;
  %Resultante
  %Módulo(kN)
    RO=(ROx.^2+ROz.^2).^0.5
  %Ángulo (°)
    alfro=atan(ROz./ROx)/pi*180

```

### 3. ESFUERZOS DE MANIOBRA

El esfuerzo de maniobra depende :

- del peso **P** de la compuerta y del brazo de la palanca de esta fuerza en relación con el eje de articulación que depende de la apertura de la compuerta
- de las fuerzas de rozamiento **F<sub>fl</sub>** de las hermeticidades laterales (brazo de palanca constante casi igual al radio del ribete)
- de las fuerzas de rozamiento **F<sub>fa</sub>** a nivel de las articulaciones que ellas dependen de las acciones de la compuerta sobre ellas, esencialmente del empuje hidráulico

Se calculó escribiendo que el momento resultante en relación del eje de articulación es nulo

Las fuerzas rozamiento **F<sub>fl</sub>** de las hermeticidades laterales dependen :

- de la longitud  $d_e$  las hermeticidades en contacto con las piezas fijas
- de la anchura de las juntas  $l_e$
- de la presión promedio  $p_m$  que se ejerce sobre las juntas
- del coeficiente de rozamiento  $tg\varphi$ , elastómero sobre acero, igual en promedio a 0.75

$$F_{fl} = 2 \operatorname{tg} \varphi p_m L_e l_e$$

Las fuerzas de rozamiento **F<sub>fa</sub>** a nivel de las articulaciones, dependen de la concepción de estas últimas (eje o rótula) y de las dimensiones de las piezas en contacto. Estas fuerzas de rozamiento y su momento son proporcionales a la acción de la compuerta sobre las articulaciones.

En general, para las compuertas del mismo tipo, el momento de estas fuerzas de rozamiento es del mismo orden del tamaño que el momento de las fuerzas de rozamiento de las hermeticidades laterales y sigue una evolución semejante con la apertura de la compuerta.

En el cuadro siguiente se presenta el método de cálculo del esfuerzo de maniobra de la apertura de la compuerta en la configuración seleccionada y representada en el fichero autocad « plano compuerta ». El peso mantenido en este cálculo es de 770 kN. El momento de las fuerzas de rozamiento a nivel de las articulaciones se ha tomado igual al momento de las fuerzas de frotamiento de las hermeticidades para todas las aperturas.