

# Cálculo de empujes Elementos de contención

## Elementos de contención

Cálculo de empujes

**CYPE**  
INGENIEROS

Software *para*  
**Arquitectura,  
Ingeniería y  
Construcción**

**CYPE Ingenieros, S.A.**

Avda. Eusebio Sempere, 5  
03003 **Alicante**  
Tel. (+34) 965 92 25 50  
Fax (+34) 965 12 49 50  
cype@cype.com

**CYPE Madrid**

Augusto Figueroa, 32-34, bajo  
28004 Madrid  
Tel. (+34) 915 22 93 10  
Fax (+34) 915 31 97 21  
cype.madrid@cype.com

**CYPE Catalunya**

Almogàvers, 64-66, 2º A  
08018 Barcelona  
Tel. (+34) 934 85 11 02  
Fax (+34) 934 85 56 08  
cype.catalunya@cype.com

**www.cype.com**

#### IMPORTANTE: ESTE TEXTO REQUIERE SU ATENCIÓN Y SU LECTURA

La información contenida en este documento es propiedad de CYPE Ingenieros, S.A. y no puede ser reproducida ni transferida total o parcialmente en forma alguna y por ningún medio, ya sea electrónico o mecánico, bajo ningún concepto, sin la previa autorización escrita de CYPE Ingenieros, S.A. La infracción de los derechos de propiedad intelectual puede ser constitutiva de delito (arts. 270 y sgts. del Código Penal).

Este documento y la información en él contenida son parte integrante de la documentación que acompaña a la Licencia de Uso de los programas informáticos de CYPE Ingenieros, S.A. y de la que son inseparables. Por consiguiente está amparada por sus mismas condiciones y deberes.

No olvide que deberá leer, comprender y aceptar el Contrato de Licencia de Uso del software del que es parte esta documentación antes de utilizar cualquier componente del producto. Si NO acepta los términos del Contrato de Licencia de Uso, devuelva inmediatamente el software y todos los elementos que le acompañan al lugar donde lo adquirió para obtener un reembolso total.

Este manual corresponde a la versión del software denominada por CYPE Ingenieros, S.A. como Elementos de contención. La información contenida en este documento describe sustancialmente las características y métodos de manejo del programa o programas a los que acompaña. La información contenida en este documento puede haber sido modificada posteriormente a la edición mecánica de este libro sin previo aviso. El software al que acompaña este documento puede ser sometido a modificaciones sin previo aviso.

CYPE Ingenieros, S.A. dispone de otros servicios entre los que se encuentra el de Actualizaciones, que le permitirá adquirir las últimas versiones del software y la documentación que le acompaña. Si Ud. tiene dudas respecto a este escrito o al Contrato de Licencia de Uso del software o quiere ponerse en contacto con CYPE Ingenieros, S.A., puede dirigirse a su Distribuidor Local Autorizado o al Departamento Posventa de CYPE Ingenieros, S.A. en la dirección:

Avda. Eusebio Sempere, 5 · 03003 Alicante (España) · Tel: +34 965 92 25 50 · Fax: +34 965 12 49 50 · [www.cype.com](http://www.cype.com)

© CYPE Ingenieros, S.A.

2ª Edición (junio, 2008)

Editado e impreso en Alicante (España)

Windows ® es marca registrada de Microsoft Corporation ®

Índice

**Cálculo de empujes .....5**

1. Introducción .....5

2. Empuje estático .....6

2.1. Cálculo del empuje activo .....6

2.2. Cálculo del empuje pasivo .....6

2.3. Cálculo del empuje al reposo .....6

2.4. Empuje de las cargas situadas sobre el terreno .....7

2.4.1. Empujes producidos por una sobrecarga  
uniformemente repartida .....7

2.4.2. Empujes producidos por una carga en banda paralela  
a la coronación .....7

2.4.3. Empujes producidos por una carga en línea paralela  
a la coronación .....7

2.4.4. Empujes producidos por una carga puntual o  
concentrada en áreas reducidas (zapatas) .....8

2.4.5. Empujes de las cargas en coronación de muro .....8

3. Empuje dinámico .....9

3.1. Cálculo del empuje activo .....9

3.1.1. Coeficiente de empuje activo en condiciones dinámicas .9

3.1.2. Ángulo de rozamiento tierras-muro .....9

3.1.3. Peso específico .....9

3.1.4. Empuje debido al agua intersticial .....10

3.1.5. Efecto de las cargas y sobrecargas en el trasdós .....10

3.2. Cálculo del empuje pasivo .....10

3.3. Peso específico .....10



# Cálculo de empujes

## 1. Introducción

Los empujes sobre un muro podrán ser de los tipos siguientes:

- **Empuje activo.** El terreno empuja al muro permitiéndose las suficientes deformaciones en la dirección del empuje para llevar al terreno a su estado de rotura. Es el caso habitual cuando se desarrolla una 'acción' del terreno.
- **Empuje al reposo.** El terreno empuja pero el muro no sufre apenas deformaciones, es decir, son nulas o despreciables. El valor del empuje es mayor que el activo.
- **Empuje pasivo.** Cuando el muro se desplaza contra el terreno, lo comprime y éste reacciona. Es siempre una 'reacción'. Su valor es mucho mayor que el activo.

Los parámetros que caracterizan un relleno son los siguientes:

- **Ángulo de talud ( $\beta$ ).** Se expresa en grados sexagesimales respecto a la horizontal. Su límite es el ángulo de rozamiento interno.
- **Densidad aparente ( $\gamma$ ).** También llamada densidad seca.
- **Densidad sumergida: ( $\gamma'$ ).** Densidad del terreno sumergido por debajo del nivel freático.
- **Ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ).** Característica intrínseca del terreno, que es el ángulo máximo de talud natural sin desmoronarse.
- **Evacuación por drenaje (sólo en muros ménsula y de sótano).** Expresado en %, permite considerar la

presencia de aguas infiltradas en el relleno que aumentan los empujes como una fracción adicional de empuje hidrostático y la densidad del terreno parcialmente saturado. Un valor X% producirá un empuje hidrostático de (100 - x) % y un empuje del terreno teniendo en cuenta el siguiente peso específico:

$$\gamma'_{\text{parcial}} = \gamma' + (\gamma - \gamma') \left[ 1 - \frac{100 - x}{100} \right]$$

Se considera que esta agua infiltrada se encuentra en toda la altura del muro.

- **Porcentaje de empuje pasivo (sólo en muros ménsula y de sótano).** Expresado en % sobre el valor del empuje pasivo.
- **Cota de empuje pasivo (sólo en muros ménsula y de sótano).** Cota por debajo de la cual se considera empuje pasivo (0 por defecto, luego sólo actuará en la zapata, si se considera empuje pasivo).
- **Roca.** Activada esta opción, le permite definir un estrato rocoso, en cuyo caso hay que dar como dato la cota a la que aparece, que debe ser inferior a la del relleno. De la cota de roca hacia abajo se anulan los empujes del relleno, pero no los hidrostáticos si los hay.
- **Nivel freático.** Por encima de dicho nivel el relleno se considera con su densidad aparente  $\gamma$  o bien con la densidad del terreno parcialmente saturado si el porcentaje de evacuación es menor del 100%, y por debajo con la densidad sumergida  $\gamma'$ , adicionando el empuje hidrostático para obtener la ley de empujes.

## 2. Empuje estático

### 2.1. Cálculo del empuje activo

El empuje activo se resuelve aplicando la teoría de Coulomb.

Los valores de la presión horizontal y vertical en un punto del trasdós situado a una profundidad  $z$  se calculan como:

$$p_h = \gamma z \lambda_h \quad ; \quad p_v = \gamma z \lambda_v$$

siendo:

$$\lambda_h = \frac{\sin^2(\alpha + \varphi)}{\sin^2 \alpha \left[ 1 + \frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)} \right]^2} =$$

$$\lambda_v = \lambda_h \cot g(\alpha - \delta)$$

$z$ : profundidad

$\alpha$ : ángulo del paramento del muro con la horizontal

$\gamma$ : densidad del terreno

$\delta$ : ángulo de rozamiento muro-terreno

$\varphi$ : ángulo de rozamiento interno del terreno

$\beta$ : ángulo de talud del terreno

En el caso de considerarse la cohesión del terreno:

$$p_h = \gamma z \lambda_h - 2 c \sqrt{\lambda_h} \cos \delta$$

siendo:

$c$  = cohesión del terreno

### 2.2. Cálculo del empuje pasivo

El cálculo del empuje pasivo es similar al cálculo del empuje activo. Basta con cambiar en las fórmulas anteriores el signo del ángulo de rozamiento interno del terreno.

Además, en el caso de considerarse la cohesión del terreno:

$$p_h = \gamma z \lambda_h + 2 c \sqrt{\lambda_h} \cos \delta$$

siendo:

$c$  = cohesión del terreno

### 2.3. Cálculo del empuje al reposo

El empuje al reposo se resuelve aplicando la teoría de Jaky.

Se calcula como:

$$p_{rep} = \gamma z K_{rep}$$

siendo:

$$K_{rep} = 1 - \sin \varphi$$

$z$ : profundidad

$\gamma$ : densidad del terreno

$\varphi$ : ángulo de rozamiento interno del terreno

En el caso de existir talud del terreno se sigue la formulación complementaria del Corps of Engineers, 1961.

## 2.4. Empuje de las cargas situadas sobre el terreno

### 2.4.1. Empujes producidos por una sobrecarga uniformemente repartida

Se aplica el método de Coulomb, donde la presión horizontal y vertical producida por una sobrecarga uniformemente repartida vale:

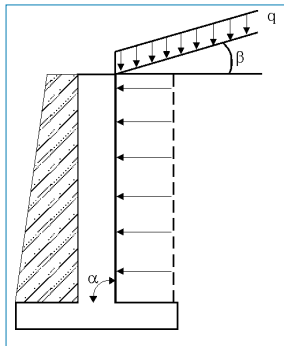


Fig. 2.1

$$p_h = \lambda_h q \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)} \quad ; \quad p_v = \lambda_v q \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)}$$

siendo:

$\lambda_h$ : coeficiente de empuje horizontal

$\lambda_v$ : coeficiente de empuje vertical

q: carga superficial

$\alpha$ : ángulo del paramento del muro con la horizontal

$\beta$ : ángulo de inclinación del relleno

### 2.4.2. Empujes producidos por una carga en banda paralela a la coronación

La presión horizontal que produce una sobrecarga en banda para el caso de trasdós vertical y terreno horizontal siguiendo la Teoría de la Elasticidad vale:

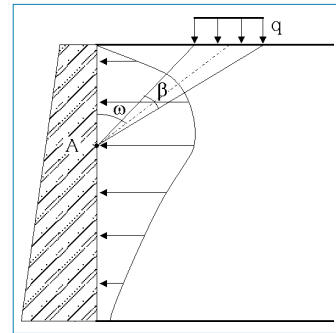


Fig. 2.2

$$p_q = \frac{2q}{\pi} (\beta - \sin \beta \cos 2\omega)$$

q: carga en banda

$\beta$  y  $\omega$ : ángulos que se desprenden de la figura. El primero de la fórmula se mide en radianes.

### 2.4.3. Empujes producidos por una carga en línea paralela a la coronación

Se ha empleado el método basado en la Teoría de la Elasticidad. La presión horizontal que produce una sobrecarga en línea q para el caso de trasdós vertical y terreno horizontal se tiene.

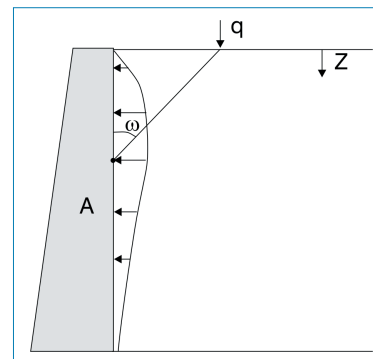


Fig. 2.3

#### 2.4.4. Empujes producidos por una carga puntual o concentrada en áreas reducidas (zapatas)

Se ha empleado el método basado en la Teoría de la Elasticidad. El empuje horizontal que produce una sobrecarga puntual para el caso de trasdós vertical y terreno horizontal se tiene:

Si ( $m < 0.4$ ),

$$p_q = 0.28 \times \frac{q}{H^2} \times \frac{n^2}{[0.16 + n^2]^3}$$

Si ( $m \geq 0.4$ ),

$$p_q = 1.77 \frac{q}{H^2} \frac{m^2 n^2}{[m^2 + n^2]^3}$$

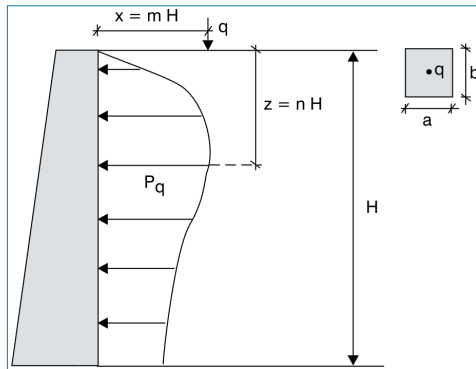


Fig. 2.4

#### 2.4.5. Empujes de las cargas en coronación de muro

Se pueden introducir cargas puntuales y momento en la coronación.

Estas cargas generan esfuerzos directamente, pero también pueden tener respuesta pasiva del terreno si es el caso.



### 3. Empuje dinámico

La acción sísmica hace que el empuje sobre los muros aumente transitoriamente. El empuje activo en condiciones sísmicas es mayor que el correspondiente a la situación estática.

De forma similar, el empuje pasivo que puede transmitir el muro contra el terreno puede reducirse notablemente durante los sismos. El empuje pasivo en condiciones sísmicas es menor que el correspondiente a la situación estática.

Para la evaluación de los empujes se ha empleado el método pseudoestático, con los coeficientes de empuje dinámicos basados en las ecuaciones de Mononobe-Okabe.

#### 3.1. Cálculo del empuje activo

##### 3.1.1. Coeficiente de empuje activo en condiciones dinámicas

El coeficiente de empuje activo en condiciones dinámicas es el siguiente:

$$K_{ad} = \frac{\cos(\alpha + \theta)}{\cos \theta \cos \alpha} K_a^*$$

siendo:

$\alpha$ : ángulo del paramento del muro con la vertical

$\theta$ : ángulo definido por las expresiones siguientes:

$$\theta = \arctg\left(\frac{a_h}{g - a_v}\right) \quad \text{Caso 1}$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{a_h}{g - a_v}\right) \frac{\gamma_d}{\gamma'} \quad \text{Caso 2}$$

donde:

$g$ : aceleración de la gravedad

$\gamma_d$ : peso específico seco

$\gamma_{sat}$ : peso específico saturado

$\gamma'$ : peso específico sumergido

$a_h$ : aceleración de cálculo horizontal

$a_v$ : aceleración de cálculo vertical, que el programa toma como mitad de la horizontal

$K_a^*$  el coeficiente de empuje activo en condiciones estáticas, pero en cuyo cálculo, en el lugar donde aparezca  $\alpha$  se introducirá  $(\alpha + \theta)$ , y donde aparezca  $\beta$  se introducirá  $(\beta + \theta)$ .

El Caso 1 corresponde a aquellos rellenos de trasdós que estén secos o parcialmente saturados, siempre situados sobre el nivel freático.

El Caso 2 corresponde a rellenos por debajo del nivel freático.

##### 3.1.2. Ángulo de rozamiento tierras-muro

Este ángulo puede disminuir notablemente durante el sismo. Esto significa un aumento adicional del empuje activo. Por tanto, considerar este ángulo 0 queda del lado de la seguridad.

##### 3.1.3. Peso específico

El empuje debido al peso de las tierras es mayor debido al aumento del peso específico del terreno, tanto por encima como por debajo del nivel freático. El coeficiente a aplicar sobre el peso específico, y que el programa considera automáticamente es:

$$f = 1 + \frac{a_v}{g}$$

siendo:

$a_v$ : aceleración de cálculo vertical =  $1/2 \cdot a_h$

$g$ : aceleración de la gravedad

### 3.1.4. Empuje debido al agua intersticial

Por debajo del nivel freático el incremento de empuje en cada punto se calcula como:

$$\Delta E_w = \frac{7}{8} \frac{a_h}{g} \gamma_w h_z$$

siendo:

$a_h$ : aceleración de cálculo horizontal

$g$ : aceleración de la gravedad

$h_z$ : profundidad

$\gamma_w$ : peso específico del agua

### 3.1.5. Efecto de las cargas y sobrecargas en el trasdós

La intensidad de las cargas sobre el relleno deberán multiplicarse por:

$$f = 1 + \frac{a_v}{g}$$

siendo:

$a_v$ : aceleración de cálculo vertical =  $1/2 \cdot a_h$

$g$ : aceleración de la gravedad

## 3.2. Cálculo del empuje pasivo

El empuje pasivo puede disminuir durante el sismo.

El coeficiente de empuje pasivo en condiciones dinámicas es el siguiente:

$$K_{pd} = \frac{\cos(\alpha - \theta)}{\cos \theta \cos \alpha} K_p^*$$

siendo:

$\alpha$ : ángulo del paramento del muro con la vertical

$\theta$ : el mismo ángulo definido para el caso de empuje activo

$K_p^*$ : el coeficiente de empuje pasivo en condiciones estáticas, pero en cuyo cálculo, en el lugar donde aparezca  $\alpha$  se introducirá  $(\alpha - \theta)$ , y donde aparezca  $\beta$  se introducirá  $(\beta - \theta)$ .

## 3.3. Peso específico

El empuje debido al peso de las tierras es menor. El coeficiente a aplicar sobre el peso específico, y que el programa considera automáticamente es:

$$f = 1 - \frac{a_v}{g}$$

siendo:

$a_v$ : aceleración de cálculo vertical =  $1/2 \cdot a_h$

$g$ : aceleración de la gravedad