

# Evaluación de las presiones dinámicas ejercidas por rellenos sobre muros de edificios (\*)

Por CARLOS NAVARRO UGENA  
Ingeniero de Caminos

*El cálculo de las presiones dinámicas ejercidas por el suelo sobre elementos estructurales es particularmente interesante dentro del campo de la Ingeniería Sísmica. En el artículo se exponen los métodos de cálculo habituales y una serie de recomendaciones prácticas, deducidas del empleo del método de los elementos finitos a este tipo de determinaciones.*

## 1. INTRODUCCION

El problema del cálculo de las presiones dinámicas ejercidas por el suelo contra una estructura ha sido tratado por numerosos autores como consecuencia del gran desarrollo experimentado por la Ingeniería sísmica en los últimos tiempos.

Sin embargo, es un problema que no está resuelto en su totalidad. Quizá pueda influir el hecho de que el empuje dinámico es, para unos niveles normales de aceleración, más pequeño que, por ejemplo, el empuje en condiciones de reposo, y que al ser práctica usual adicionar estos dos tipos de empuje para obtener la distribución de las presiones ejercidas por el suelo contra el muro, el determinar exactamente aquél tenga un interés relativo. No obstante pueden producirse situaciones en las que el empuje dinámico sea importante, sobre todo en la Ingeniería Nuclear donde las hipótesis de partida son más severas.

No se pretende aquí resolver el problema, sino proporcionar algunas recomendaciones ya que, como consecuencia de los estudios realizados mediante la técnica de los elementos finitos, se ha podido comprobar que el método tradicional empleado para el cálculo del empuje dinámico puede infravalorarlo.

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de noviembre de 1981.

## 2. BREVE ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

### 2.1. Empuje dinámico del suelo seco

En un reciente artículo de Nazarian-Hadjian (5) se resume, detalladamente, el estado del problema. En este apartado se hace un breve resumen del trabajo precitado, completándolo con los resultados obtenidos mediante análisis del problema usando la técnica de elementos finitos.

Los métodos de cálculo pueden ser agrupados en cuatro categorías diferentes:

a) Métodos basados en la suposición de que el terreno en contacto con el muro ha plastificado, formándose la consiguiente cuña de empuje. Son soluciones pseudoestáticas, en las que no se considera ningún fenómeno de inercia en el muro, siendo la base de todas ellas la teoría de Mononobe-Okabe (6 y 7), que es el método tradicional.

El método de Mononobe-Okabe supone que el empuje total desarrollado en condiciones sísmicas por el suelo contra el muro es debido a la formación de una cuña de empuje con su correspondiente plano de falla.

Sobre esta cuña se suponen actuando, además de su peso y de las fuerzas de reacción del suelo y del muro, unas fuerzas de inercia obtenidas multiplicando las máximas aceleraciones, horizontal y vertical, del suelo por la masa de la cuña. Estableciendo que el plano de falla será aquél que proporcione el máximo empuje (caso activo), puede cal-

cularse éste. Si a este empuje se le resta el correspondiente a condiciones estáticas se obtiene el empuje dinámico (ver Fig. 3a).

b) Métodos basados en la teoría de las ondas elásticas. Suponen, esencialmente, un comportamiento elástico del suelo, al que se le asignan unas propiedades fijas independientes de la deformación.

c) Métodos basados en un comportamiento no lineal en la zona de contacto suelo-muro. Estos métodos se han aplicado, principalmente, en condiciones estáticas.

d) Métodos basados en los estudios mediante la técnica de los elementos finitos, cuyas consecuencias fundamentales serán comentadas posteriormente.

En la tabla 1 se resumen algunos valores del empuje dinámico obtenido en el problema concreto especificado en la Fig. 1, siguiendo a diferentes autores.

TABLA 1. Comparación entre los resultados obtenidos siguiendo a diferentes autores, del caso representado en la Fig. 1

Autor	Empuje en Tn/m.	
Mononobe-Okabe	12,5	Métodos plásticos
Prakash-Basavanna	12,6	
Richards-Elms	9,57	
Datta-Nigam	11,35	
Seed-Whitman	10,6	
Nandakumaran-Joshi	7,57	
Jakolev	6,57	
Wood	28,75	Métodos Elásticos
Scott	16,64	
Matuo-Ohara	16,0	

Nota: Las referencias de estos autores pueden ser encontradas en la lista de referencias bibliográficas de la ref. 4 del presente artículo.

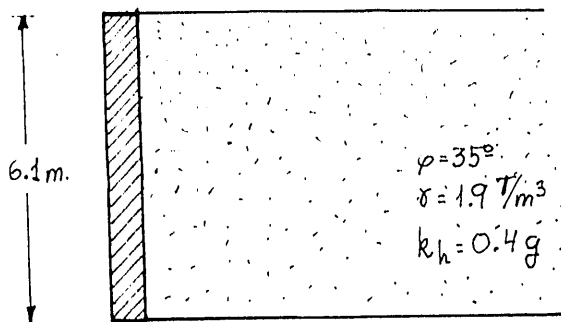


Fig. 1. Ejemplo Tabla 1.

Como se puede observar, los métodos elásticos conducen a valores superiores a los obtenidos mediante las teorías plásticas.

Nazaria-Hadjian (5) concluyen su trabajo señalando que no existe, actualmente, una solución exacta del problema, pero se conoce su límite inferior (método de Mononobe-Okabe) y el superior (análisis elástico de Wood (10)).

Por otra parte, las soluciones obtenidas basadas en la aplicación al problema de la técnica de los elementos finitos, conducen a unos resultados muy interesantes de los que se enumeran los más importantes:

Aggour-Brown (1) analizaron el problema para distintas rigideces del muro, llegando a la conclusión de que para la hipótesis de muro muy rígido, el valor del empuje dinámico era máximo y que la ley de variación de las presiones dinámicas era sensiblemente triangular, con el máximo en superficie según se indica en la Fig. 2.

Dong (2) analizó varios modelos de elementos finitos mediante el programa Lush, llegando a la conclusión de que para un muro rígido de 14,3 m. de altura y un relleno granular caracterizado por una Velocidad de propagación de las ondas de cortante de 300 m/s., las presiones dinámicas obtenidas resultaron ser 1,65 veces superiores a las deducidas según el método de Mononobe-Okabe. Además, Dong, cita una recomendación personal del profesor Seed que consiste, esencialmente en multiplicar por un factor, que varía de 1 a 3, los empujes dinámicos calculados por el método Mononobe-Okabe, dependiendo de las rigideces del suelo y del muro.

Recientemente, Huang et al. (4), han presentado un estudio comparativo entre las soluciones obtenidas utilizando el método tradicional y el programa de elementos finitos Lush, en el caso de un muro rígido de 12,2 m. de altura en contacto con un material cohesivo ( $v_s = 375 \text{ m/s.}$ ) y otro no

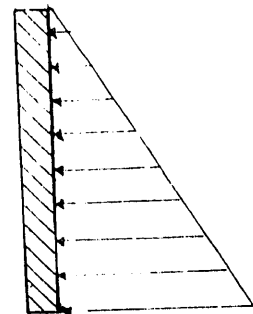
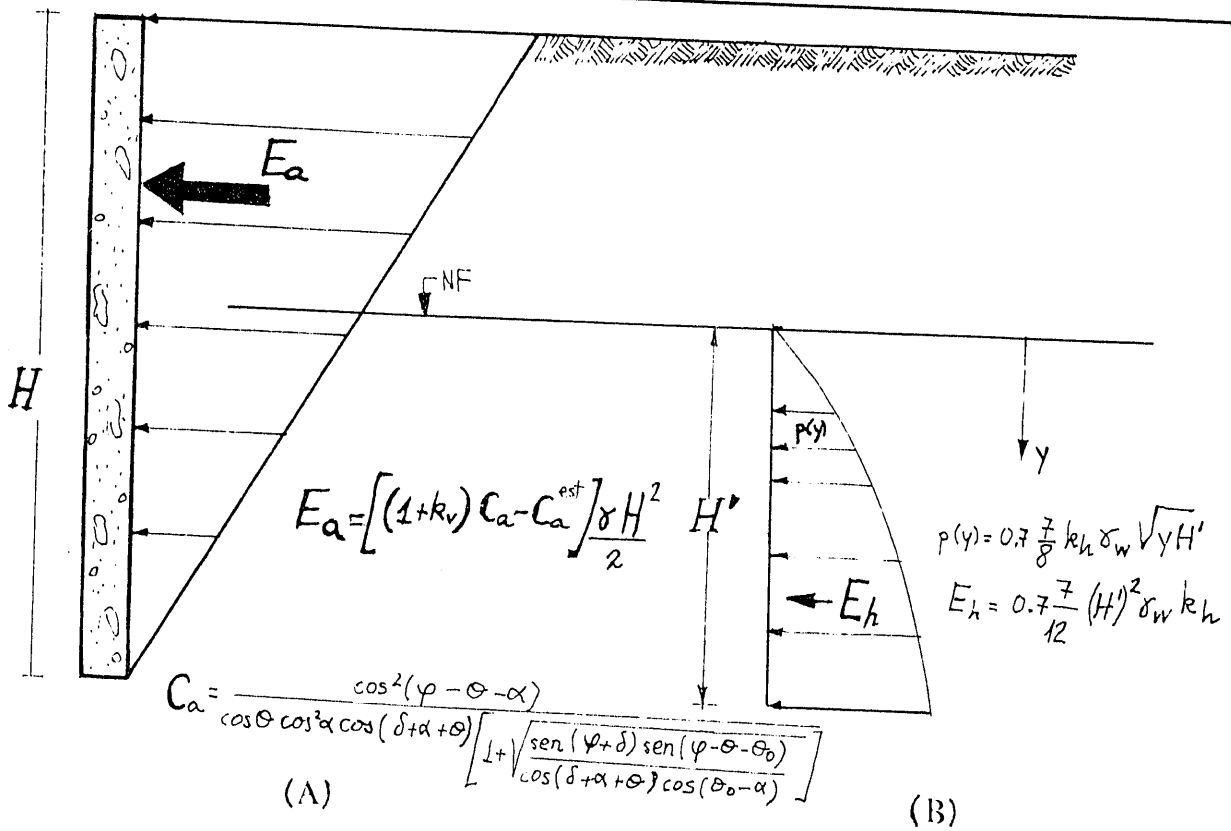


Fig. 2. Ley de distribución de las presiones dinámicas.



Método de Mononobe-Okabe.

Figura 3.

Método de Matuo-O'Hara.

cohesivo ( $v_s = 225$  m/s.), suponiendo el input sísmico situado en dos posiciones diferentes, en superficie y al nivel de la base del muro, llegando a la conclusión de que los empujes obtenidos me-

dante el programa Flush, en la hipótesis de input sísmico en superficie, varían de 1,47 a 2,33 veces los obtenidos según el método tradicional. En la hipótesis de input sísmico situado al nivel de la base del muro, los empujes hallados, resultan variar entre 2,74 a 3,5 de los obtenidos según Mononobe-Okabe.

Asimismo, estos autores, realizaron un análisis paramétrico de la influencia de la flexibilidad del muro en el valor del empuje (Fig. 4). Se puede observar que cuanto más flexible es el muro menos empuje actúa sobre él.

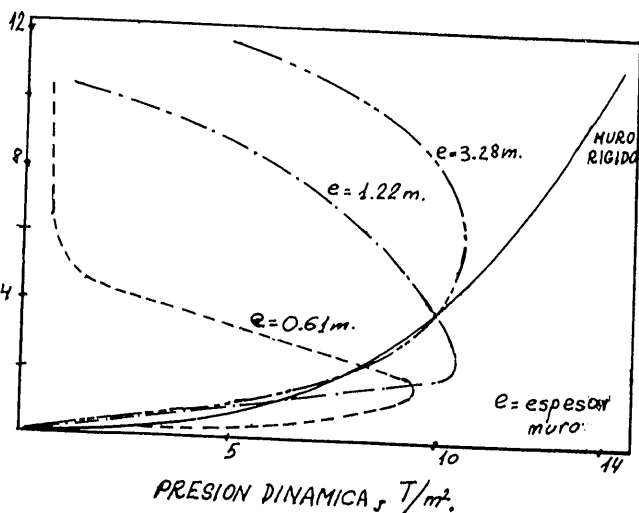


Fig. 4. Variación del empuje con la rigidez del muro.

## 2.2. Empuje hidrodinámico

Una de las hipótesis básicas del método de Mononobe-Okabe consiste en suponer que el terreno es un relleno granular seco. Para el cálculo del empuje hidrodinámico ejercido por el agua intersticial, Matuo-O'Hara (4), desarrollaron un procedimiento de cálculo, llegando a la conclusión de que las presiones hidrodinámicas máximas son del orden del 70 % de las deducidas aplicando la teoría de Weestergaard (9).

## 3. EMPUJE DINAMICO DEL SUELO CONTRA LOS MUROS DE UN EDIFICIO

En el método tradicional, así como también en la mayoría de los estudios realizados mediante la técnica de los elementos finitos, se suponía que el muro en cuestión era el clásico de sostenimiento de tierras, aplicándose los resultados así obtenidos al caso de que se tratara de un muro de un edificio masivo.

El autor del presente artículo ha efectuado análisis mediante el programa de elementos finitos Flush del modelo esquematizado en la Fig. 5 en el que se consideró la presencia de un edificio masivo de 120.000 T., que descansa en un substrato rocoso caracterizado por un módulo de rigidez de 350.000 T/m<sup>2</sup>, módulo de Poisson de 0,47 y peso específico de 2,24 T/m<sup>3</sup>, y rodeado de un relleno granular bien compactado con un módulo de rigidez máximo de 20.000 T/m<sup>2</sup>, módulo de Poisson de 0,40, y peso específico de 2,1 T/m<sup>3</sup> ( $v_s = 300$  m/s.).

Se supuso que el espesor del estrato de relleno era de 9,5 m., que la excitación sísmica eran unos acelerogramas, uno horizontal y el otro vertical, situados en la superficie del estrato de relleno, cuyos espectros de respuesta era el horizontal definido en la R.G. 1.60 (8) normalizado a 0,12 g. para horizontal y 0,085 g. para vertical, y que el muro del edificio en contacto con el suelo era rígido.

Los empujes obtenidos resultaron ser de 17 T/m. para la excitación horizontal y de 6 T/m. para la vertical, mientras que la teoría de Mononobe-Okabe proporciona un valor del empuje dinámico, consi-

derando la acción simultánea de los dos tipos de excitación, cercano a 11 T/m.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones que se derivan de todo lo anteriormente expuesto pueden resumirse así:

a) El método de Mononobe-Okabe proporciona valores del empuje dinámico que no son conservadores, lo que es de especial importancia en sismos de gran intensidad en los que el coeficiente de seguridad se reduce considerablemente.

b) El análisis mediante la modelización del terreno y del muro por elementos finitos es la herramienta de cálculo más adecuada para la correcta interpretación del problema.

c) Que a la vista de todo lo anteriormente expuesto, y cuando no esté justificado un análisis detallado, pueden establecerse las siguientes recomendaciones para la determinación del empuje dinámico:

1.º) Aplicar la teoría de Mononobe-Okabe (caso activo) y multiplicar el resultado obtenido por un factor de dos, que es el valor medio de los recomendados por Seed y que para un relleno granular con una velocidad de propagación de las ondas de cortante de 300 m/s. es conservador y no penaliza excesivamente el diseño del muro.

2.º) Suponer la ley de variación de las presiones dinámicas triangular, con el máximo en superficie y nulo en la parte inferior del muro.

3.º) Adicionar al empuje calculado las presiones hidrodinámicas, que se estimarán como el 70 % de las deducidas según la teoría de Weestergaard.

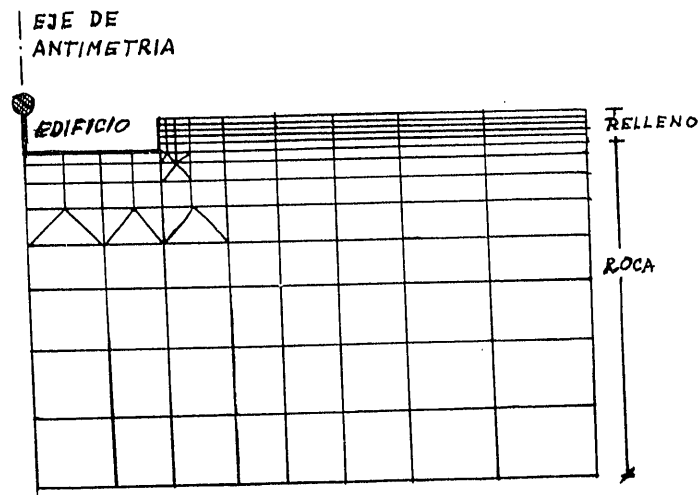


Fig. 5. Esquema del modelo utilizado. Flush.

# EVALUACION DE LAS PRESIONES DINAMICAS EJERCIDAS POR RELLENOS SOBRE MUROS

## Nomenclatura utilizada

- $C_a$ : Coeficiente de empuje activo total deducido según Mononobe-Okabe.  
 $C_a^{est}$ : Coeficiente de empuje activo estático.  
 $E_a$ : Empuje dinámico  
 $E_h$ : Empuje hidrodinámico  
 $g$ : Aceleración de la gravedad.  
 $G$ : Módulo de rigidez  
 $H$ : Altura del muro  
 $H'$ : Altura del nivel freático sobre la base del muro.  
 $k_h$ : Aceleración máxima horizontal dividida por la de la gravedad.  
 $k_v$ : Aceleración máxima vertical dividida por la de la gravedad.  
 $p(y)$ : Presión hidrodinámica a la profundidad  $y$  respecto a N.F.  
 $v_s$ : Velocidad de propagación de las ondas de corte =  $\sqrt{G/\rho}$   
 $\alpha$ : Angulo de inclinación del muro respecto de la vertical.  
 $\delta$ : Angulo de rozamiento tierra-muro.  
 $\rho$ : Peso específico del suelo.  
 $\rho_w$ : Peso específico del agua.  
 $\rho$ : Densidad del suelo  
 $\varphi$ : Angulo de rozamiento interno del suelo.  
 $J$ : Arctg.  $k_h/1-k_v$   
 $\theta_o$ : Angulo de inclinación de la superficie del suelo respecto de la horizontal.

## BIBLIOGRAFIA

1. AGGOUR-BROWN. "Retainig Walls in Seismic Areas". Fifth World Conference on Earthquake Engineering. Roma, 1973.
2. DONG. "Comparing the LUSH Code and Current Methods for Calculating Structural Loads in Large Pools". Nuclear Engineering and Design, 44 (1977) 371-381, North Holland Publishing Company.
3. HUANG et al. "Earthquake Induced Lateral Earth Pressure". Civil Engineering and Nuclear Power. Conf. Sept. 1980. Knoxville, Tennessee.
4. MATUO-OHARA. "Dynamic Pore Water Pressures Acting of Quay Walls During Earthquakes". Third World Conf. on Earthquake Engineering. 1965.
5. NAZARIAN-HADJIAN. "Earthquake-Induced Lateral Soil Pressures on Structures". Jour. Geotechnical Engineering Division, ASCE. Sept. 1979.
6. MONONOBE-MATSUO. "On the Determination of Earth Pressures During Earthquakes". World Engineering Congress, 1924.
7. OKABE. "General Theory of Earth Pressure". Journal of the Japan Society of Civil Engineers. Tokio, 1926.
8. REGULATORY GUIDE 1.60, USAEC. "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants". Oct. 1973.
9. WEESTERGAARD. "Water Pressures on Dams during Earthquakes". ASCE. Vol. 98. 1933.
10. WOOD. "Earthquake-Induced Soil Pressures on Structures". Tesis presentada en el Instituto de Tecnología de California. 1973.