

# Aproximación a partir de modelos estáticos del estado tensional inducido por un sismo en la sección transversal de una estructura enterrada

GIL MARTÍN, L. M. (\*); HERNÁNDEZ MONTES, E. (\*); FUENTE MARTÍN, P. DE LA (\*\*)

**RESUMEN** En este artículo se propone un método estático para aproximar el estado tensional existente en la sección transversal de una estructura enterrada en un estrato de relleno granular de espesor uniforme, cuando éste se ve sometida a la acción de un sismo. Las leyes de esfuerzos obtenidas a partir de modelo estático propuesto aproximan suficientemente bien a las reales, que han sido obtenidas a partir de un análisis dinámico completo, quedando del lado de la seguridad si se mayoran los valores de Momentos flectores y axiles estáticos por 2.

## APPROXIMATION FROM STATIC MODELS OF STRESS STATE INDUCED BY AN EARTHQUAKE IN A BURIED STRUCTURE CROSS-SECTION

**ABSTRACT** *In this paper we propose a static method to approximate the stress state of a buried structure cross-section when is subjected to a seismic action. The structure is placed in a granular backfill layer with uniform thickness. The stress laws obtained with the static model in this paper are quite approximate to the real ones. The real analysis has been developed by a full dynamic analysis. If we use a safety coefficient of 2 to enlarge the moments and the axil static efforts we are on the safe side of the approximation.*

### Palabras clave:

## 1. INTRODUCCIÓN

Constantopoulos *et al.* (1979) desarrollaron un método simplificado para determinar las tensiones producidas en una estructura enterrada cuando ésta se ve sometida a la acción de un sismo. La principal ventaja de este método es que sólo requiere de cálculos estáticos y consideraciones muy groseras del efecto de interacción suelo-estructura.

En este artículo se plantean modelos estáticos para aproximar el estado tensional existente en la sección transversal de una estructura enterrada cuando ésta se ve sometida a una acción sísmica; en este artículo se han considerado las ondas P y S de propagación vertical.

Se han analizado estructuras de sección cuadrada de reducidas dimensiones ( $l \leq 5$  m) enterradas en un estrato de relleno granular de espesor uniforme, apoyado a su vez sobre roca.

La dimensión horizontal del modelo estático se ha determinado a partir del análisis de los desplazamientos modales correspondientes a los modos de vibración horizontal y verti-

cal, respectivamente, del modelo. El modelo estático propuesto únicamente estará sometido a la acción de los desplazamientos de campo libre que serán introducidos en determinados nodos del modelo y que habrán sido previamente determinados a partir de un análisis dinámico completo del modelo.

Los resultados obtenidos a partir de los modelos estáticos se comparan con los reales, obtenidos del cálculo dinámico llevado a cabo con el programa FLUSH (Lysmer 1975 - Berkeley). Se han considerado acelerogramas estadísticamente independientes compatibles con el espectro de respuesta de la Regulatory Guide 1.60, que han sido definidos tanto en superficie como a nivel del contacto suelo-roca para tener en cuenta los efectos de amplificación del estrato de relleno.

Para modelizar el relleno granular en el análisis dinámico se ha admitido que los valores del Módulo de Rigidez Transversal y del Amortiguamiento interno del material varían con la deformación angular tal y como sugirieron Hardin y Drnevich. En el modelo estático se ha considerado un Módulo de Elasticidad para el relleno granular constante, correspondiente al valor deducido por el programa FLUSH en la última iteración para el nivel medio de la estructura.

## 2. VIBRACIONES HORIZONTALES

El análisis estático simplificado propuesto se lleva a cabo a partir del modelo representado en la figura 1, cuya dimen-

(\*) Dr. Ingeniero de Caminos. E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada.

(\*\*) Dr. Ingeniero de Caminos. E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

sión vertical corresponde al espesor del estrato de suelo considerado y cuya dimensión "2\*d" se determina a partir del estudio de los desplazamientos modales correspondientes al modo fundamental horizontal de vibración, cuya frecuencia para el caso de un estrato horizontal de espesor constante en condiciones de campo libre, apoyado sobre base rígida, viene dada por la expresión:

$$f = \frac{V_S}{4H} = \sqrt{\frac{G}{4H\rho}}$$

donde:

G : es el módulo de corte del estrato

ρ : es el peso específico del estrato

H : es el espesor del estrato

Las frecuencias y las formas modales se han obtenido a partir de un modelo bidimensional considerando un estado de deformación plana. El eje inferior del modelo está fijo, simulando una cimentación sobre roca. En el centro del modelo, a diferentes profundidades, se encuentra enterrada una estructura de sección cuadrada. El suelo circundante se ha discretizado empleando elementos rectangulares de 4 nodos y dos grados de libertad por nodo. La sección transversal de la estructura se ha modelizado mediante elementos viga.

La dimensión horizontal del modelo estático se determina a partir de la comparación de los desplazamientos modales asociados al modo fundamental de vibración (horizontal en este caso —posteriormente se procederá de idéntica forma para el análisis vertical—) en condiciones de campo libre con los correspondientes al caso de que exista una estructura enterrada. Como resultado de estas comparaciones se definen unas distancias "d" —distancias de influencia—, contadas desde el centro del modelo, que determinan la zona de influencia debida a la presencia de la estructura enterrada en el valor de los desplazamientos modales. Se ha supuesto que la estructura enterrada deja de afectar al valor de los desplazamientos modales de un punto "P" cuando:

$$\frac{\delta_{SE} - \delta_{CL}}{\delta_{CL}} \leq 0,05$$

siendo δ<sub>SE</sub> el desplazamiento modal en el punto "P" cuando se considera el sistema suelo-estructura y δ<sub>CL</sub> el desplazamiento modal en el mismo punto en condiciones de campo libre.

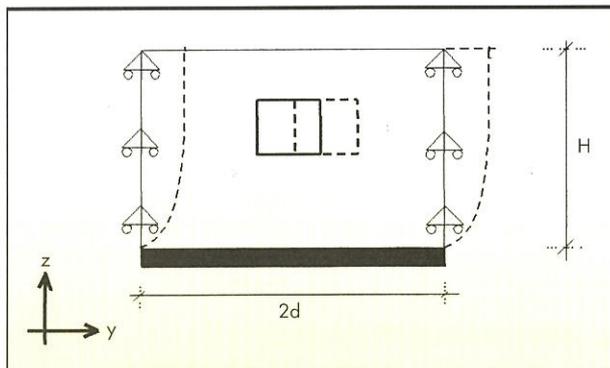


FIGURA 1. Modelo estático para vibraciones horizontales.

La única acción a la que está sometido el modelo estático de la figura 1 son los desplazamientos horizontales en condiciones de campo libre, obtenidos a partir del análisis dinámico del sistema suelo-estructura llevado a cabo con el programa FLUSH, y que son impuestos a los nodos de los bordes laterales del modelo (tal y como se representa con línea discontinua en la figura 1).

### 3. VIBRACIONES VERTICALES

El análisis estático simplificado se lleva a cabo a partir de un modelo cuya dimensión vertical corresponde al espesor del estrato de suelo considerado y cuya dimensión horizontal "2\*d" se determina a partir del estudio de los desplazamientos modales correspondientes al modo fundamental vertical de vibración, análogamente a como se hizo para el caso de las vibraciones horizontales. El criterio adoptado ha sido el del 5%, el mismo que para el análisis de las vibraciones horizontales.

En este caso, la frecuencia fundamental de vibración de un estrato horizontal de espesor constante en condiciones de campo libre, apoyado sobre base rígida es:

$$f = \frac{V_P}{4H} = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{4H\rho}}$$

$$\lambda = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)}$$

En el modelo estático de la figura 2, dada la propia naturaleza de las vibraciones verticales, el desplazamiento en campo libre ha sido impuesto a los nodos situados en la superficie del modelo estático.

### 4. VERIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Para comprobar la validez de la metodología propuesta se han analizado distintos modelos. Para cada caso se ha llevado a cabo un análisis dinámico completo, mediante el programa FLUSH, y un análisis estático simplificado a partir de los modelos propuestos.

En primer lugar se han comparado los momentos flectores (Nw\*m) y los esfuerzos axiales (Nw) existentes en el punto más desfavorable de la sección transversal del túnel —dadas las reducidas dimensiones de las estructuras analizadas, su dimensionamiento conviene hacerlo uniforme—.

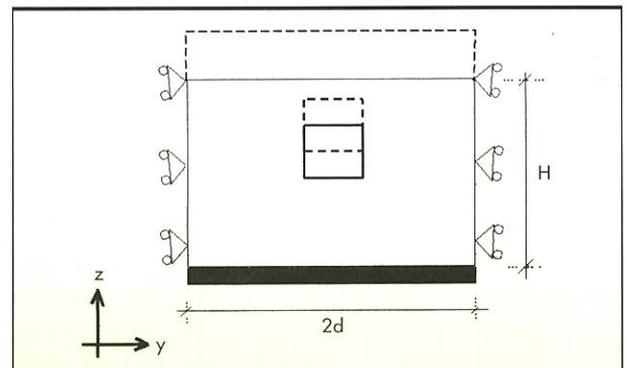


FIGURA 2. Modelo estático para vibraciones verticales.

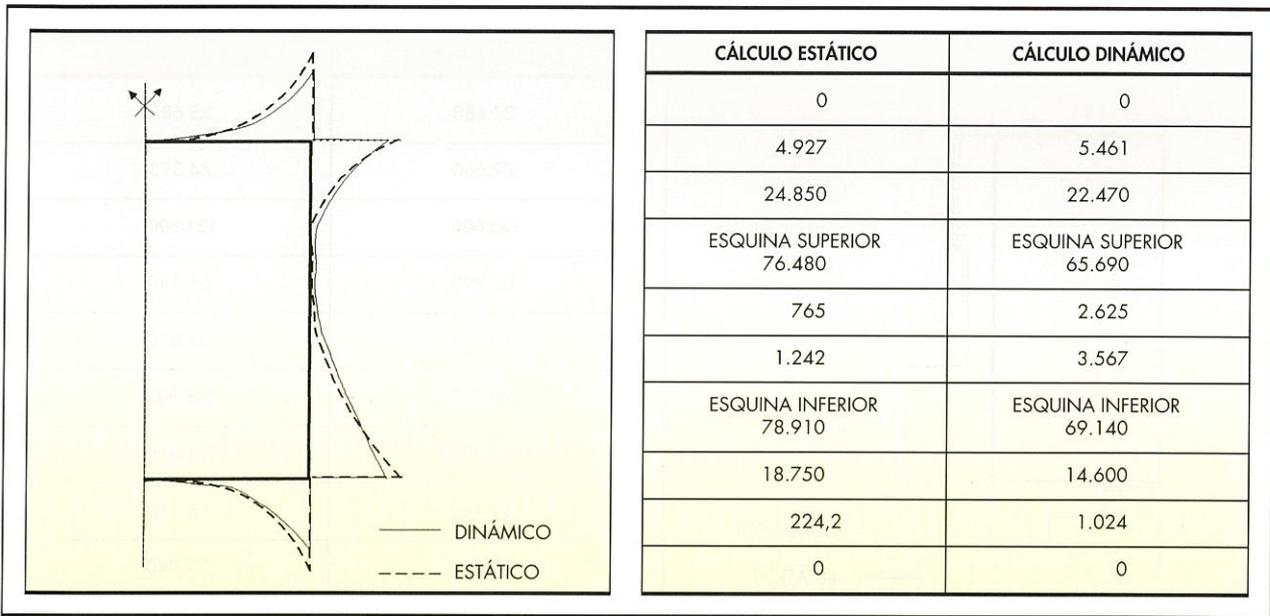


FIGURA 3. Momentos flectores (Nw\*m).

El coeficiente de mayoración a aplicar al valor de la tensión normal obtenida a partir del cálculo estático propuesto es el parámetro que definirá la bondad de la aproximación obtenida:

$$k = \frac{\sigma_{din}}{\sigma_{est}}$$

Además, se ha comprobado que este coeficiente “k” corresponde a la relación entre los máximos momentos flectores dado que la contribución del esfuerzo axial en el valor total de la tensión normal es muy pequeña.

En todos los casos analizados, tanto para excitación horizontal como vertical, el máximo coeficiente por el que hay que multiplicar la tensión estática obtenida para alcanzar el valor dinámico ha sido 1.7. Por tanto, el valor de k=2 aplicado al análisis estático simplificado propuesto cubre suficientemente el estado de tensiones obtenido a partir del análisis dinámico completo del sistema suelo-estructura.

Ahora bien, se ha comprobado que la metodología estática propuesta no sólo conduce a una buena aproximación de los valores máximos de los esfuerzos existentes en la sección transversal de la estructura enterrada sino que tanto las leyes de momentos flectores como la de axiles obtenidas a partir del análisis del modelo estático son similares a las reales.

En las figuras 3 y 4 se representan las leyes de Momentos flectores (Nw\*m) y axiles (Nw) respectivamente obtenidas mediante la metodología propuesta y las deducidas a partir del análisis dinámico completo, para el caso de las vibraciones horizontales. Los valores de los esfuerzos dibujados se indican en las tablas correspondientes<sup>1</sup>.

<sup>(1)</sup> Estos esfuerzos corresponden a un estrato de 20 m de potencia (H = 20 m), apoyado sobre roca rígida, con una estructura enterrada de 3 m de lado (l = 3 m), situada a una profundidad de 15 m (p = 15 m). El acelerograma ha sido definido en el contacto relleno granular-roca y escalado a 0.15 g. Se han considerado valores medios para la variación de G<sub>max</sub> con la deformación angular.

De las figuras 3 y 4 se desprende que las leyes de esfuerzos en el marco del túnel obtenidas a partir del método simplificado son similares a las deducidas del análisis dinámico completo llevado a cabo por el programa FLUSH, lo que corrobora la bondad del método.

Al igual que para el caso de movimiento horizontal, para verificar la aproximación de los esfuerzos obtenida a partir del modelo estático no sólo en el punto donde los esfuerzos son mayores sino en todo el marco del mismo, en las figuras 5 y 6 se representan las leyes de Momentos flectores (Nw\*m) y axiles (Nw), respectivamente, obtenidas mediante la metodología propuesta y a partir del análisis dinámico completo. Los valores de los esfuerzos dibujados se indican en las tablas<sup>2</sup>.

Al igual que sucedía para el caso de las vibraciones horizontales, las leyes de esfuerzos en el marco del túnel obtenidas mediante el método simplificado son similares a las reales.

### 5. INFLUENCIA DE LA DIMENSIÓN HORIZONTAL DEL MODELO ESTÁTICO EN LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En los puntos anteriores se ha verificado la buena aproximación de los esfuerzos en el marco del túnel a la que conduce la metodología propuesta. Para ello, como ya se ha visto, se han determinado unos modelos estáticos cuya dimensión horizontal idónea ha sido estimada a partir del análisis de los modos fundamentales de vibración horizontal y vertical respectivamente. Pues bien, en este punto vamos a analizar en qué medida los resultados obtenidos a partir

<sup>(2)</sup> Estos esfuerzos corresponden a un estrato de 20 m de potencia (H = 20 m), apoyado sobre roca rígida, con una estructura enterrada de 3 m de lado (l = 3 m), situada a una profundidad de 15 m (p = 15 m). El acelerograma ha sido definido en la superficie del estrato de relleno y escalado a 2/3\* 0.15 g. Se han considerado valores medios para la variación de G<sub>max</sub> con la deformación angular.

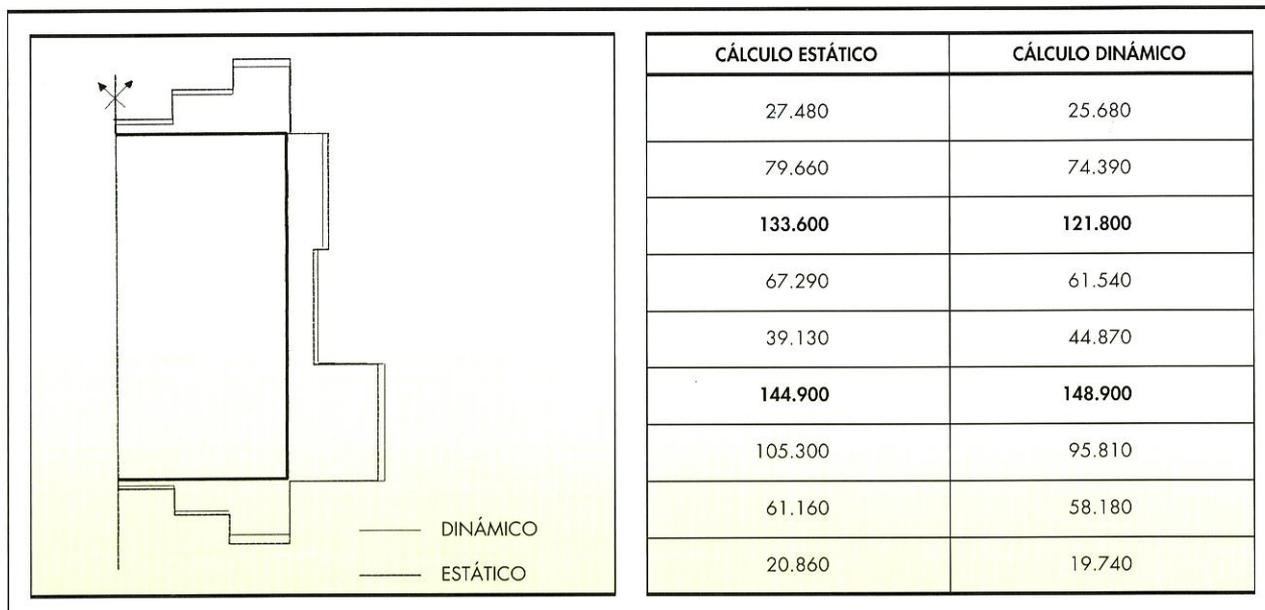


FIGURA 4. Axiles (Nw).

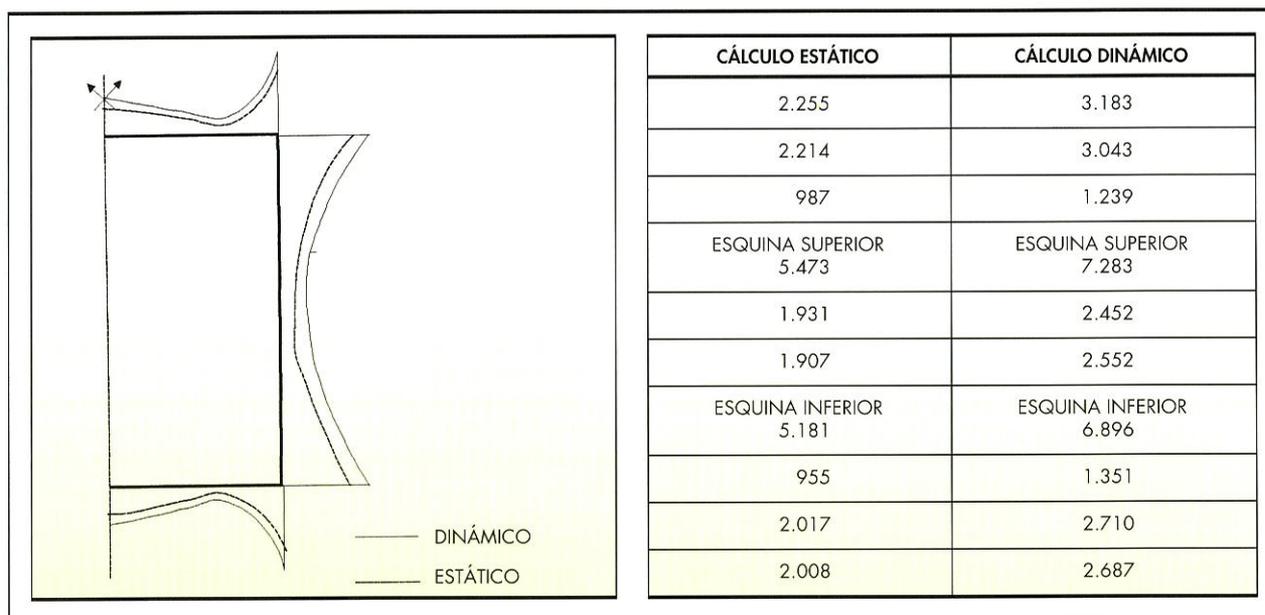


FIGURA 5. Momentos flectores (Nw\*m).

del análisis estático se ven afectados cuando la dimensión del modelo estático no es la “distancia de influencia”, que hemos determinado a partir del análisis modal, sino otra cualquiera.

Para ello, se han analizado algunos de los modelos anteriores (concretamente para  $H = 16$  m y  $l = 5$  m) para los que hemos llevado a cabo un segundo análisis estático considerando, en todos los casos, una dimensión horizontal del modelo de 6.00 m (“d” = 3.00 m). Los resultados obtenidos a partir de estos modelos se comparan con los valores reales determinados a partir del análisis dinámico mediante el programa FLUSH en la Tabla 1.

Para determinar la influencia de la dimensión horizontal del modelo estático en los resultados finales se comparan estos valores de “k” ( $\sigma_{dir}/\sigma_{est}$ ) con los que se habrían obtenido si la dimensión horizontal del modelo estático hubiese sido determinada a partir del análisis de los modos fundamentales de vibración (ver Tabla 2).

Por tanto, queda comprobado que la mejor aproximación estática se obtiene si como dimensión horizontal del modelo se adopta la obtenida a partir del análisis de los modos de vibración, tal y como propone la metodología estática simplificada expuesta.

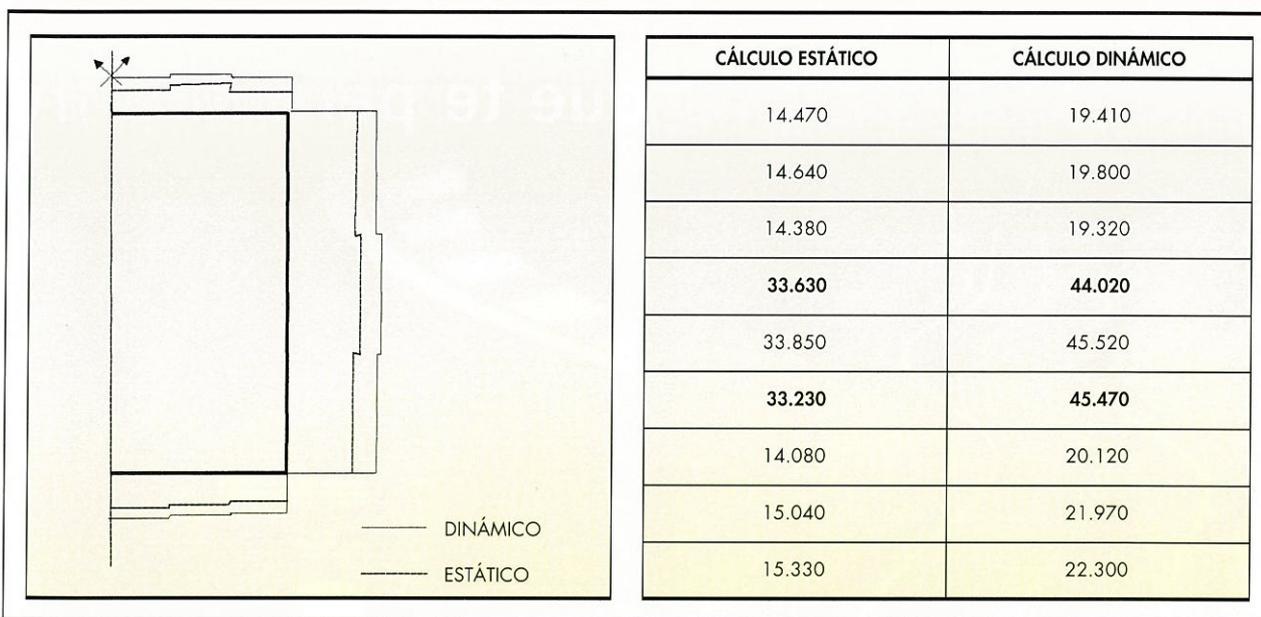


FIGURA 6. Axiles (Nw).

MODELO	Mf din	Mf est	A din	A est	k = $\sigma_{din} / \sigma_{est}$
p = 10 m, $a_{roca} = 2/3 * 0.10$ g	40.850	39.880	111.000	113.200	<b>1,02</b>
p = 2 m, $a_{sup} = 2/3 * 0.15$ g	12.880	12.420	27.630	28.920	<b>1,02</b>
p = 10 m, $a_{sup} = 2/3 * 0.15$ g	26.890	16.930	63.610	45.050	<b>1,56</b>
p = 10 m, $a_{roca} = 2/3 * 0.10$ g	152.700	77.540	355.200	199.200	<b>1,94</b>
p = 2 m, $a_{roca} = 2/3 * 0.10$ g	96.060	55.330	196.000	124.500	<b>1,71</b>

TABLA 1.

"d" influencia	"d" = 3 m
1,02	1,02
1,00	1,02
1,45	1,56
1,66	1,94
1,52	1,71

TABLA 2.

### BIBLIOGRAFÍA

1. ATOMIC ENERGY COMMISSION. "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants". Regulatory Guide 1.60. Directorate of regulatory Standards. Washington. 1973.
2. CLOUGH, R. W. and PENZIEN, J. "Dynamics of Structures". McGraw-Hill. 1993.

3. CONSTANTOPOULOS, I. V.; MOTHERWELL, J. T. and HALL, J. R. "Dynamic Analysis of Tunnels". Third International Conference on Numerical Method in Geomechanics. Abril 1979.
4. CONSTANTOPOULOS, I. V.; COLE-BAKER and MICHAPOULOS. "Seismic Analysis of Buried Tunnels". Proceeding of the 7th. Wold Conf. Earthquake Engng. 1980.
5. CONSTANTOPOULOS, I. V.; MOTHERWELL, J. T. and HALL, J. R. "Seismic Analysis of Buried Tunnels". Proceeding of the 7th. Wold Conf. Earthquake Engng. 1980.
6. Foundations and Buried Structures. "Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities". ASCE. 1980.
7. HARDIN, B. O. and DRNEVICH, V. P. "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves". Journal Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, SM7667-692.1972.
8. LYSMER ET AL. "FLUSH: a computer program for approximate 3D analysis of soil-structure interaction problems". Geotechnical Engineering Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley. 1975.