

Interacción Suelo – Revestimiento de la Sección de un Túnel ante un Evento Sísmico Aplicando el Método Hidrodinámico

Adolfo Camilo Torres Prada*

RESUMEN

El presente artículo resume la investigación numérica relevante a la estimación del comportamiento de la estructura de un túnel de sección circular sometido a la acción de un sismo. Para determinar la interacción entre el suelo por donde se desplazan las ondas sísmicas y la estructura del túnel se calculó el estado de esfuerzos por el método hidrodinámico, utilizando el programa de cálculo VOLNA®. Fueron estudiados los niveles de incidencia en el fenómeno de los siguientes siete factores: forma de la onda sísmica, período de vibración de la onda, ángulo de ataque del frente de onda, profundidad de emplazamiento, radio de la sección del túnel, espesor de pared y sobrecarga en superficie. Finalmente, se concluye que de los anteriores factores los que más influyen en la reacción estructural del túnel durante el evento sísmico son el período de vibración de la onda sísmica y el espesor de pared del revestimiento.

Palabras clave: interacción, hidrodinámica, estado de esfuerzos, ondas sísmicas, túnel.

Взаимодействия Грунта И Тоннельных Обделок На Сейсмические Воздействия Методом Гидродинамики

РЕЗЮМЕ

В этой статье дается результаты математического исследования к оценке динамического воздействия на напряженное состояние конструкции тоннеля кругового очертания. Расчет проводится методом гидродинамики реализован в программном комплексе «Волна». Для настоящего исследования было выбрано семь факторов, по изменениям которых можно судить о степени их влияния, рассматриваемые факторы: Форма сейсмической волны; Период колебания волны; Угол падения волны; Глубина заложения; Радиус обделок; Приведенная толщина обделок; Нагрузка на поверхности. В выводах установлено, что из всех проанализированных факторов, толщина обделки и период колебания волны наиболее существенно влияют на напряженное состояние конструкция тоннеля при сейсмическом воздействии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Взаимодействие, гидродинамика, напряженное состояние, сейсмическая волна, тоннель.

* Ingeniero Civil – Universidad Nacional de Colombia, Ph.D. en Ciencias Técnicas. Especialidad de Diseño y construcción de caminos, aeródromos, puentes, metropolitanos y túneles de transporte – Universidad Estatal de Vías de Comunicación de San Petersburgo. Profesor Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de La Salle. Correo electrónico: camtopa@yandex.ru
Fecha de envío: 30 de enero de 2007
Fecha de aceptación: 10 de abril de 2007

INTRODUCCIÓN AL MÉTODO HIDRODINÁMICO

En los trabajos de investigación de Svitin (1987) y Limonov *et al.* (1989) se demostró la posibilidad de utilizar la hidrodinámica para el cálculo del estado de esfuerzos en estructuras subterráneas emplazadas en suelos blandos bajo la acción de fuerzas sísmicas.

De los resultados obtenidos por Svitin (1987) se puede destacar como hipótesis fundamental que los parámetros de viscosidad y compresibilidad de suelos no cohesivos, saturados y sometidos a la acción de una fuerte onda sísmica, permiten que el suelo obtenga características muy similares a la de un líquido no viscoso y poco compresible.

En el método de cálculo, el revestimiento circular de un túnel se idealiza como una membrana cilíndrica. Con condiciones que permiten utilizar la teoría de membrana,

$$\frac{R}{t_0} > 10 \quad [1]$$

Donde t_0 es el espesor de la sección de la membrana, y R su radio interno. En caso contrario se producen imprecisiones en los resultados, debido a la difracción de las ondas sísmicas en el cuerpo de la estructura. Si la estructura se emplaza relativamente cerca de la superficie, en ella actúan entre otras: la presión geostática vertical, posibles sobrecargas en superficie, la presión lateral geostática, la presión hidrostática del agua intersticial del suelo, la acción sísmica como un tren de ondas con características particulares espectrales y de forma. El cálculo se realiza por medio del método de diferencias finitas considerando relaciones no lineales tanto físicas (fractura-

ción y descompresión del medio) como geométricas (grandes deformaciones) y también considerando la superposición del frente de ondas del tren sísmico actuante, las ondas reflejadas por la superficie de terreno y por la misma estructura subterránea. Bajo este método trabaja el programa de cálculo "VOL-NA®" (Svitin, 1994) empleado en la presente investigación numérica.

El cálculo se realiza en estado plano, los datos de entrada mínimos requeridos son: profundidad de emplazamiento, magnitud y distribución de las sobrecargas en superficie, posición del nivel freático, peso unitario del material del revestimiento y del suelo, los respectivos módulos elásticos y coeficientes de Poisson, velocidad de propagación de onda y velocidad de vibración de las partículas del suelo.

La máxima magnitud de la presión del frente de onda se puede determinar por la Ecuación 2.

$$A = \rho \cdot C \cdot V, \text{ k N/m}^2 \quad [2]$$

Donde: $\rho = \gamma/g$ - densidad del medio, $\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$;
 γ - Peso unitario volumétrico, kN/m^3 ;
 g - aceleración en caída libre, m/s^2 ;
 C - velocidad del frente de onda, m/s ;
 V - velocidad de vibración de las partículas del suelo, m/s .

La velocidad de vibración de las partículas del suelo, producida en respuesta a la escala de determinado sismo, puede representar, en términos generales, la magnitud del efecto sísmico.

La ecuación de movimiento de una membrana cilíndrica esta dada por la Ecuación 3.

$$\frac{\partial^2 \delta_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial \delta_\tau}{\partial \theta} = \frac{(1-\mu^2) \cdot \rho \cdot R^2}{E} \cdot \frac{\partial^2 \delta_\theta}{\partial t^2};$$

$$\frac{\partial \delta_\theta}{\partial \theta} + \frac{h^2}{12 \cdot R^2} \left(\frac{\partial^4 \delta_\tau}{\partial \theta^4} + 2 \cdot \frac{\partial^2 \delta_\tau}{\partial \theta^2} + \delta_\tau \right) + \delta_\tau = -\frac{(1-\mu^2) \cdot R^2}{E \cdot h} \cdot \left(Q + \rho \cdot h \cdot \frac{\partial^2 \delta_\tau}{\partial t^2} \right) \quad [3]$$

Donde: $\delta_\theta, \delta_\tau$ - desplazamiento relativo angular y radial de un punto de la membrana;
 E, μ, ρ - modulo elástico, MPa; Coeficiente de Poisson; y densidad del material de la membrana, $\kappa\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$;
 R, h - radio y espesor de pared de la membrana, m;
 θ - coordenada angular del punto en la membrana, grados°;
 t - instante de tiempo, s;
 Q - magnitud de la presión en la construcción, $\kappa\text{N}/\text{m}^2$, dada por la Ecuación 4.

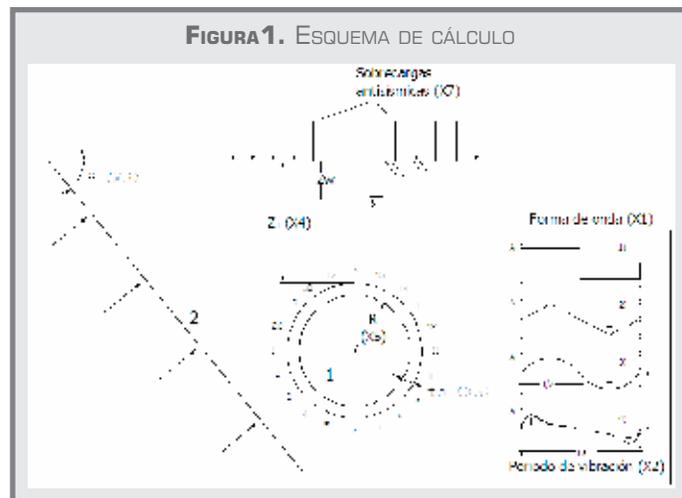
$$Q = Q_n - Q_o = Q_n - \rho_0 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \quad [4]$$

Donde: ρ_0 - densidad del líquido, $\kappa\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$;
 Q_n, Q_o - presión de la onda de ataque y la reflejada, $\kappa\text{N}/\text{m}^2$;
 Ψ - Potencial de velocidad de la onda reflejada, que se puede determinar a partir de la Ecuación 5.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} + \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau} + \frac{1}{\tau^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} = \frac{1}{C} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad [5]$$

Donde: τ - Coordenada radial
 C - velocidad de la onda sísmica, m/s.

Para el proceso de cálculo se asume que en el infinito el medio se estabiliza y que las condiciones iniciales vuelven a cero. El inicio del cálculo concuerda con el momento en que el frente de onda toca la membrana. En los instantes siguientes el frente de onda avanza por el contorno de la membrana y el frente reflejado desde la estructura se mueve en sentido contrario de regreso al medio. Los cálculos se realizan utilizando como modelo idealizado el esquema presentado en la Figura 1. La membrana y el medio que la rodea se dividen radial y concéntricamente en n nudos. En cada nudo se genera una red de puntos donde se calcula el potencial de velocidad y el desplazamiento radial y angular de la membrana.



1. Túnel de radio R; 2. Frente de onda de ataque, θ - Ángulo de ataque de la onda sísmica; Zw - Profundidad del nivel freático; Z_T - Profundidad de emplazamiento; R - Radio de la sección, to - Espesor de pared.

PLANEACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La planeación de la investigación de la sección analizada se compone de varias etapas, las cuales constituyen un adecuado modelo de investigación matemática, de acuerdo a lo establecido por Adler *et al.*, en 1976.

Los parámetros de interés en la presente investigación son los esfuerzos en la sección, tanto en su contorno externo (σ_e), como en el interno (σ_i), las fuerzas normales (N) y los momentos torsores (M).

Para la actual investigación se escogieron algunos factores, que son reconocidos por la experiencia del autor (Torres, 2004) y de otras referencias (Okamoto, 1973) como posibles factores con un alto grado de influencia en los cambios de las magnitudes de los parámetros estudiados, variando cada uno de estos factores se puede determinar el grado de influencia de cada uno de ellos en el desempeño de la sección bajo la acción sísmica. Estos factores son: la forma de la onda sísmica, período de vibración de la onda, ángulo de ataque del frente de onda, profundidad de emplazamiento, radio de la membrana, espesor de pared de la membrana y sobrecarga en superficie (Tabla 1).

Para cada uno de los anteriores factores de entrada se estableció una codificación y se determinó con antelación al cálculo, el grado de variación (Kv) en un intervalo dado de magnitudes.

TABLA 1. CODIFICACIÓN DE FACTORES Y PLANEACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS EN LA INVESTIGACIÓN

FACTORES	CÓDIGO DE LA VARIACIÓN	UNIDAD	INTERVALO DE VARIACIÓN	FACTOR DE VARIACIÓN	NÚMERO DE VARIANTES (Kv)	VALORES DE CÁLCULO
Forma de la onda sísmica	X1		0 - 4	1	4	Sinusoidal Exponencial Triangular Rectangular
Período de vibración de la onda	X2	s	0.5 - 1.5	~0.5	4	0.5; 1.0; 1.2; 1.5
Ángulo de ataque del frente de onda	X3	grados °	0 - 90	45	3	0; 45; 90
Profundidad de emplazamiento	X4	m	8 - 40	~7	5	8.0; 15; 20; 30; 40
Radio de la membrana	X5	m	1.87 - 3.10	~0.25	5	1.87; 2.15; 2.32; 2.55; 3.10
Espesor de pared de la membrana	X6	m	0.06 - 0.12	0.02	4	0.06; 0.08; 0.10; 0.12
Sobrecarga en superficie	X7		0 -1	1	2	Con o sin
Número total necesario de variantes de cálculo (Nv):					27	

Los parámetros del suelo y del material de la estructura permanecieron constantes, se estableció la profundidad del nivel freático en 6 m para todos los cálculos y se adoptaron los siguientes parámetros sísmicos que tampoco se variaron: velocidad de onda sísmica primaria = 900 m/s, y velocidad de vibración de las partículas del suelo = 0.13 m/s.

De esta manera se determinó que el número necesario de variantes a calcular es de $N_v = 27$, sin embargo, el número de cálculos se extendió a un total de 60, para generar un número de resultados más

amplio con lo que se pudo estimar mejor el grado de influencia de cada factor en el fenómeno estudiado. El nivel cero (inicial) de la investigación se produce para todas las variantes estudiadas bajo condiciones estáticas ($t = 0$ s, de la acción sísmica).

Como resultado de cada uno de los cálculos se obtuvieron las envolventes de esfuerzos σ_e y σ_i , y también los diagramas de fuerzas cortantes y momentos torsores en cada uno de los $n = 20$ nudos en que se dividió el contorno de la estructura del túnel.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

EFFECTO DE LA FORMA DEL IMPULSO DE ONDA EN EL ESTADO DE ESFUERZOS DE LA SECCIÓN

En la primera serie de cálculos se modeló una sección de radio 2.55 m, espesor de pared de 0.25 m, profundidad de emplazamiento 20 m, y con un período de vibración de 1.2 s. Considerando las cuatro variables de forma de la onda sísmica (Figura 1, factor X1): rectangular, triangular, sinusoidal y exponencial y todos los resultados se compararon con los cálculos realizados para la misma sección bajo la presión geoestática considerando las sobrepresiones por efecto del nivel freático.

Para el análisis de los resultados obtenidos fueron evaluadas las envolventes de máximos esfuerzos $\sigma_{e\max}$ y $\sigma_{i\max}$, las cuales muestran que en la sección bajo las cargas sísmicas, el esfuerzo máximo en la sección $\sigma_{e\max}$ se incrementa en 2.6 veces más que en condiciones estáticas, y $\sigma_{i\max}$ en 3.7 veces. También se observó que, en términos generales, los valores de σ_e y σ_i tienen magnitudes muy similares y que la forma del espectro sísmico no influye en un grado importante (Figura 2), por esto, en todos los siguientes cálculos se empleó una sola variante, la cual corresponde a una forma de onda del tipo exponencial.

Analizando de manera más detallada el efecto de un frente de onda, idealizado con una forma exponencial de su espectro, se determinaron las envolventes de esfuerzos máximos en cada uno de los nudos de la sección, observándose que los nudos de la parte superior de la sección son los que sufren una mayor variación de magnitud de los esfuerzos ante el sismo (Figura 3). Esta variación en la magnitud de los esfuerzos sucede durante el período de vibración de la onda sísmica (Figura 4).

Se puede observar un fuerte y rápido cambio en las condiciones de trabajo de la estructura durante la vibración, desde una condición inicial bajo condiciones estáticas, cuando la estructura está sometida exclusivamente a compresión, hasta sufrir tensiones bajo la acción sísmica.

EFFECTO DEL PERÍODO DE VIBRACIÓN (T) SOBRE EL ESTADO DE ESFUERZOS DE LA SECCIÓN

En esta serie de cálculos se estudió un modelo de sección de 2.70 m de radio, con espesor de pared de 0.30 m y emplazada a una profundidad de 20 m, variando en tres valores el período de vibración (T) del sismo, así: 0.5 s, 1.0 s y 1.5 s.

Para el análisis de los resultados obtenidos se estudiaron las envolventes de esfuerzos máximos tanto en el contorno externo $\sigma_{e\max}$, como en el interno $\sigma_{i\max}$ de la sección (Figura 5).

Los resultados obtenidos muestran que existe una relación directamente proporcional entre el aumento de la magnitud de los esfuerzos máximos y el período de vibración de la onda sísmica, es decir, que a medida que el período de vibración de la onda de ataque se incrementa, también aumentan los esfuerzos máximos sobre el contorno de la sección (Figura 6a). Esta relación puede ser entendida a partir de las relaciones del espectro sísmico, pues la presión máxima producida por el frente de onda depende directamente de los parámetros de onda, que para esta investigación algunos permanecen estables, con los siguientes valores: velocidad de onda $V_o=900$ m/s, y la velocidad de vibración de las partículas del suelo $V_s=0.13$ m/s, pero al incrementar los valores de T, la longitud de la onda también aumenta, pues $V_o=L_o/T$, y la onda sísmica tiene una mayor influencia sobre la estructura; por lo tanto, las presiones acumuladas en el período T sobre la estructura serán mayores.

FIGURA 2. DEPENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LA SECCIÓN BAJO DIFERENTES FORMAS DEL ESPECTRO DE ONDA.

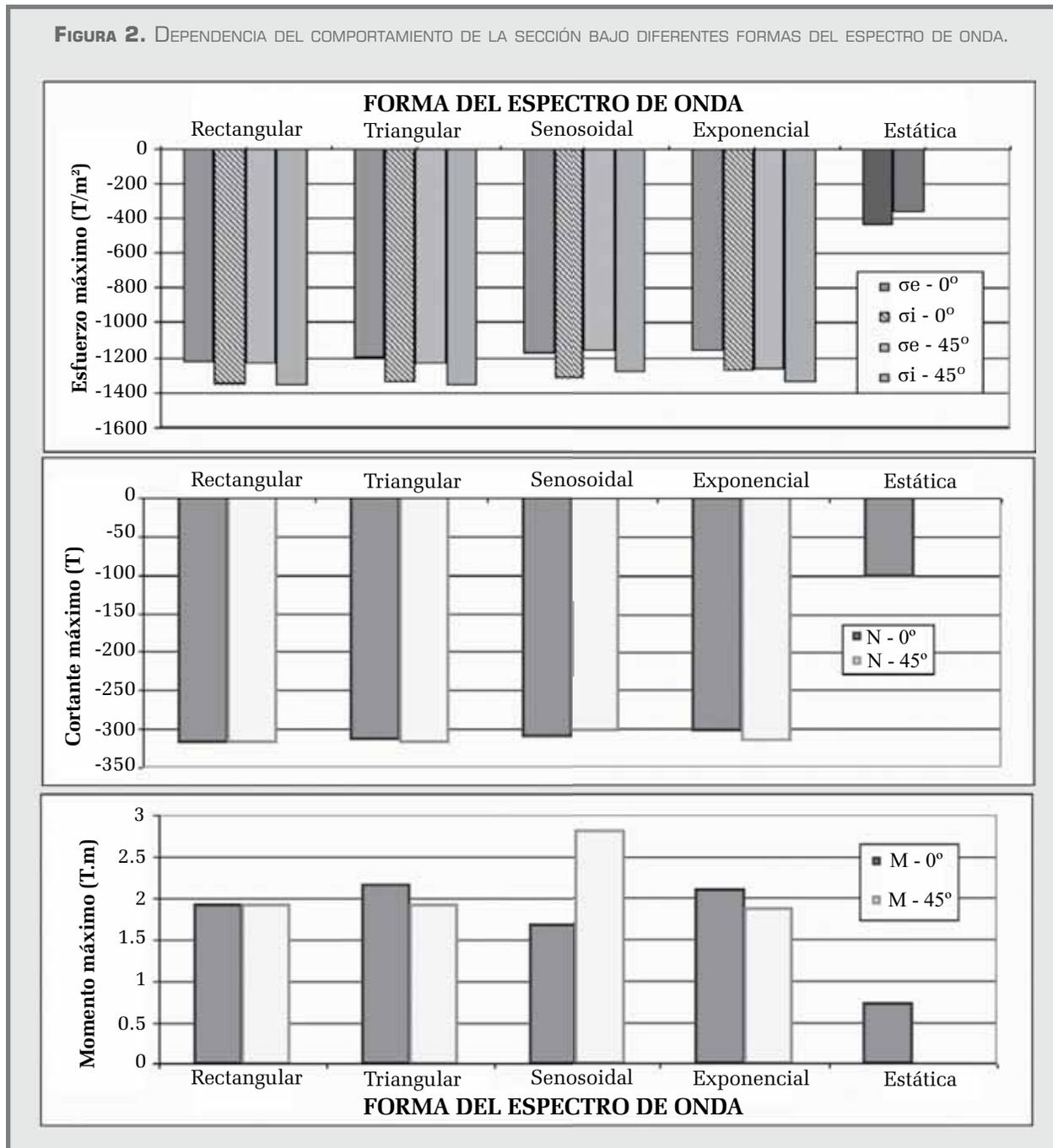


FIGURA 3. ENVOLVENTE DE ESFUERZOS MÁXIMOS DE LA SECCIÓN BAJO LA ACCIÓN DE SISMO CON FORMA DE ONDA EXPONENCIAL.

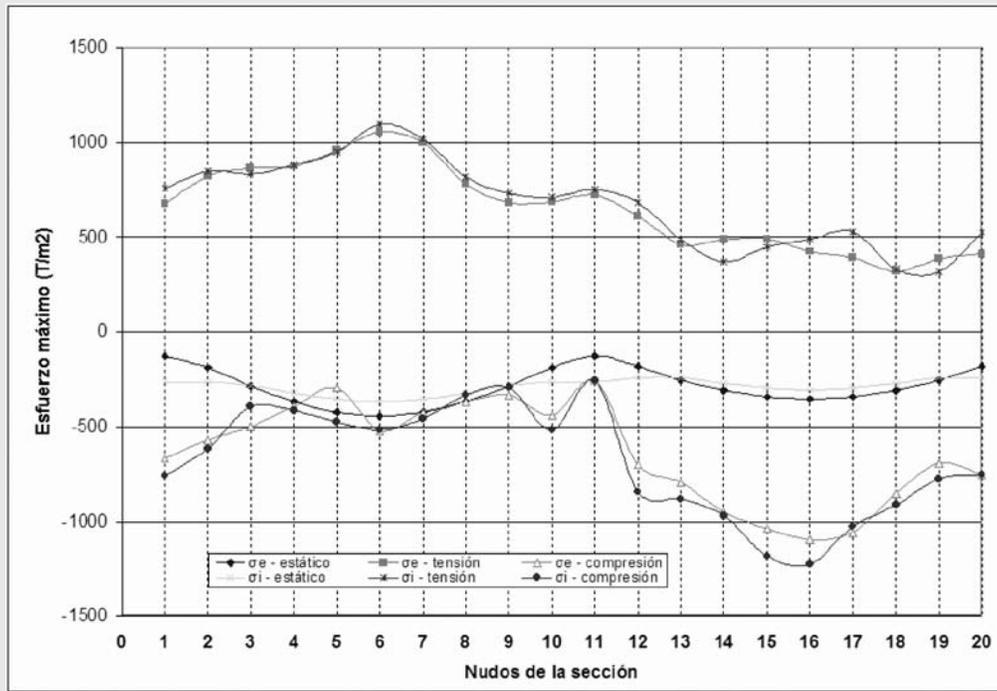


FIGURA 4. CAMBIO DE ESTADO DE LA SECCIÓN DURANTE EL PERIODO DE VIBRACIÓN.

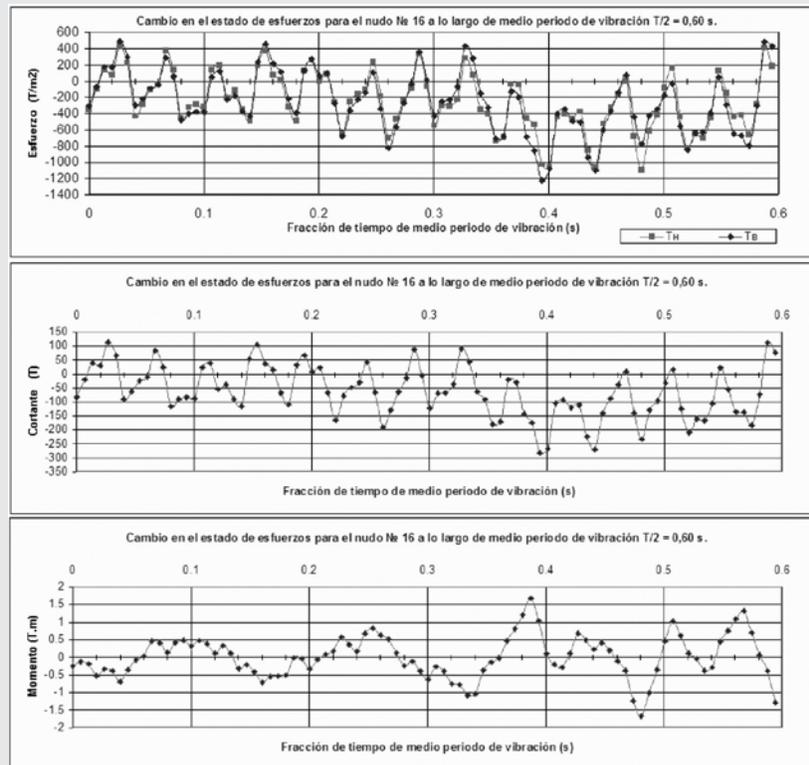


FIGURA 5. ESFUERZOS MÁXIMOS PRODUCIDOS POR LOS EVENTOS SÍSMICOS DE DIFERENTES PERIODOS DE VIBRACIÓN (T).

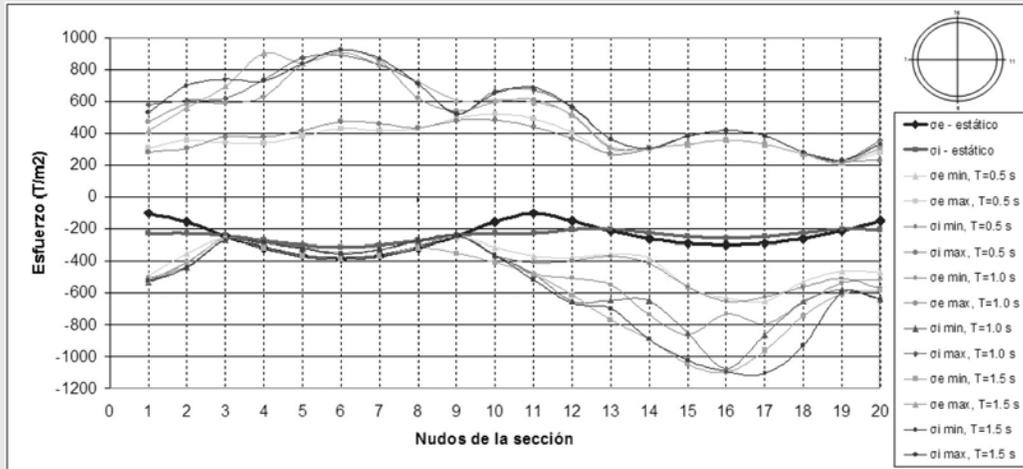
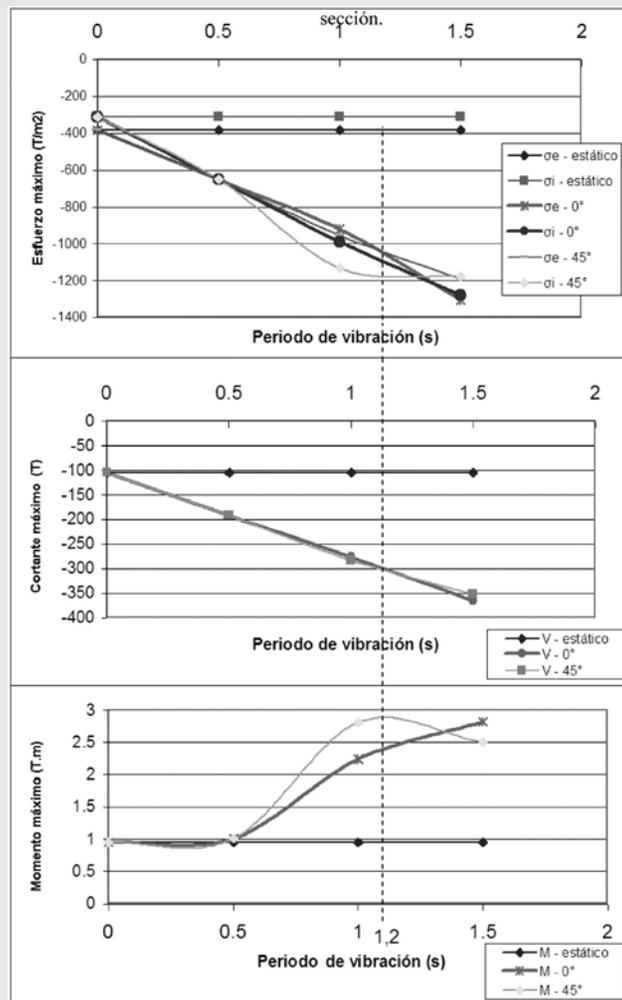


FIGURA 6. RELACIÓN ENTRE EL PERIODO DE VIBRACIÓN DE ONDA SÍSMICA Y EL COMPORTAMIENTO DE LA SECCIÓN.



Del análisis de las envolventes resultantes, también se puede observar que a medida que aumenta el período de vibración, su influencia sobre el estado de esfuerzos es muy alta; por ejemplo, si observamos con detalle el efecto de un sismo con una onda de período de vibración $T=1.2$ s, los esfuerzos se incrementan en aproximadamente 3 veces más que en estado estático.

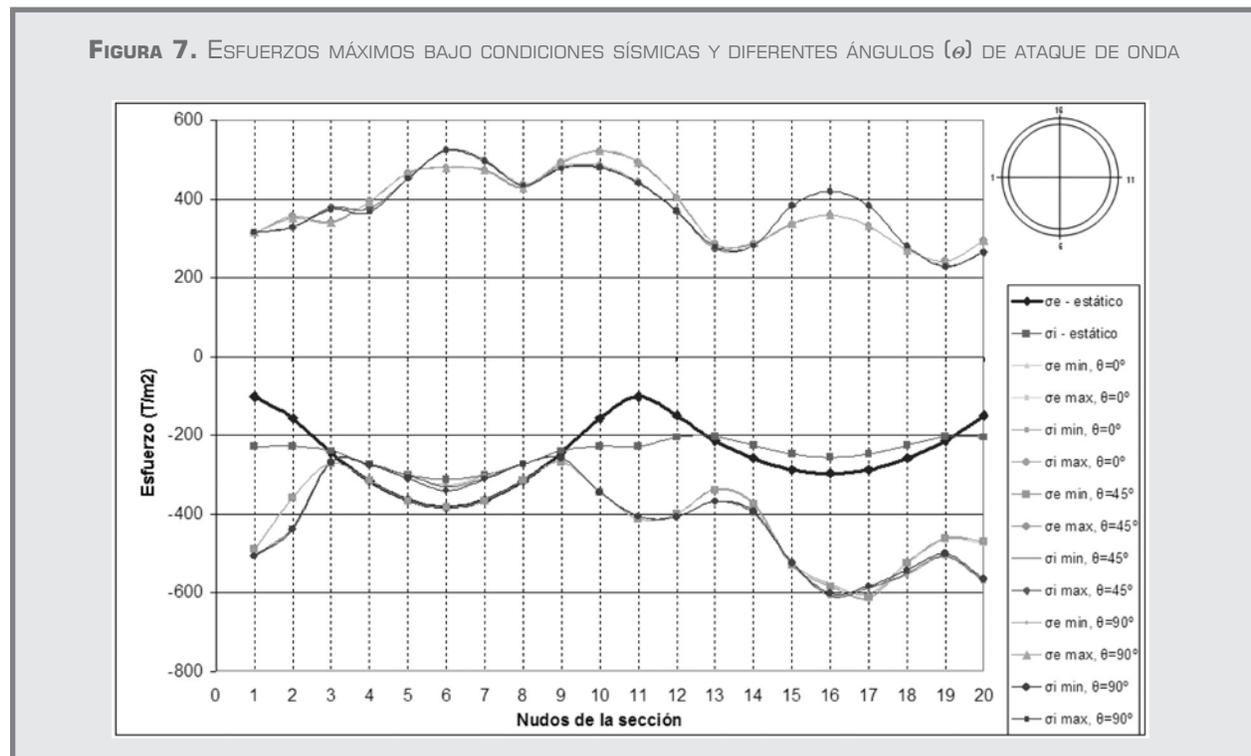
Para el análisis de la influencia del período de vibración sobre el comportamiento de la sección de la estructura ante fuerzas sísmicas, se construyeron y analizaron las gráficas de cambio de los esfuerzos máximos, las fuerzas cortantes máximas (Figura 6b) y los momentos máximos producidos en la sección (Figura 6c).

En general, se observa que los cambios en el período de vibración del sismo (T) tienen una influencia en un grado muy alto sobre el comportamiento mecáni-

co de la sección de la estructura; sin embargo, para el caso particular estudiado en la presente serie de cálculos se observa que entre el rango de períodos de vibración entre $0.0 \text{ s} < T < 0.5 \text{ s}$, no se presentan cambios importantes en las magnitudes de los momentos máximos.

EFFECTO DEL ÁNGULO DE ATAQUE DEL FRENTE DE ONDA (θ) SOBRE EL ESTADO DE ESFUERZOS DE LA SECCIÓN

Para este análisis, se modeló una sección estructural con un radio de 2.70 m, un espesor de pared de 0.30 m, emplazada a una profundidad de 20 m, y bajo diferentes ángulos de ataque del frente de onda (θ), así: 0° , 45° y 90° con respecto a la superficie del terreno, que se idealiza horizontal (ver Figura 1, factor X3), se observaron las envolventes de los esfuerzos máximos en los contornos externo $\sigma_{e \text{ max}}$ e interno $\sigma_{i \text{ max}}$ de la sección (Figura 7).



Del análisis de la gráfica se puede concluir que, bajo diferentes ángulos de ataque del frente de onda el estado de esfuerzos de la estructura no se altera significativamente; es decir, que este factor de la acción sísmica no tiene un grado de influencia importante en el fenómeno en estudio. Esto se puede explicar si se tiene en cuenta que la dimensión de la estructura es, con mayor frecuencia, más pequeña que los parámetros sísmicos de la onda de ataque y, por consiguiente, se puede decir que el frente de onda actúa sobre todo el contorno de la sección de manera instantánea.

Además se pudo observar que también, considerando diferentes profundidades de emplazamiento y alterando otros parámetros, el ángulo de ataque del frente de onda no influye en el estado de esfuerzos bajo condiciones sísmicas, así los cálculos demostraron que la diferencia de los esfuerzos máximos en la sección bajo condiciones sísmicas con diferentes ángulos (θ) no varían en más del 1%.

EFEECTO DE LA PROFUNDIDAD DE EMPLAZAMIENTO (Z_r) SOBRE EL ESTADO DE ESFUERZOS DE LA SECCIÓN

En esta serie de cálculos de la sección se trabajaron las siguientes profundidades de emplazamiento: 8, 15, 20, 30 y 40 m para una estructura de radio 2.70 m con espesor de pared de 0.3 m y sometidos a espectros sísmicos de diferentes períodos de vibración y con diversos ángulos de ataque del frente de onda.

El análisis de los resultados de esta serie de cálculos permite establecer que a medida que aumenta la profundidad de emplazamiento se altera el estado de esfuerzos de la sección, respondiendo al aumento de la presión geostática del estrato suprayacente a la sección. Al mismo tiempo, al aumentar la profundidad de emplazamiento el efecto relativo de la acción

sísmica sobre la estructura disminuye. Así, por ejemplo, para un sismo de período de vibración $T=1.2$ s, (Figura 8) y una profundidad de emplazamiento de 8 m se obtiene que el aumento de los esfuerzos máximos en la sección se incrementa en más de 3 veces los iniciales, entre tanto para una profundidad de 30 m el incremento es de tan sólo 1.5 veces, y para ésta última profundidad con un sismo de $T=5$ s, los esfuerzos máximos se incrementan en tan sólo un 60% del estado estático. Lo que de nuevo muestra un significativo efecto de la acción sísmica sobre el estado de esfuerzos de la estructura.

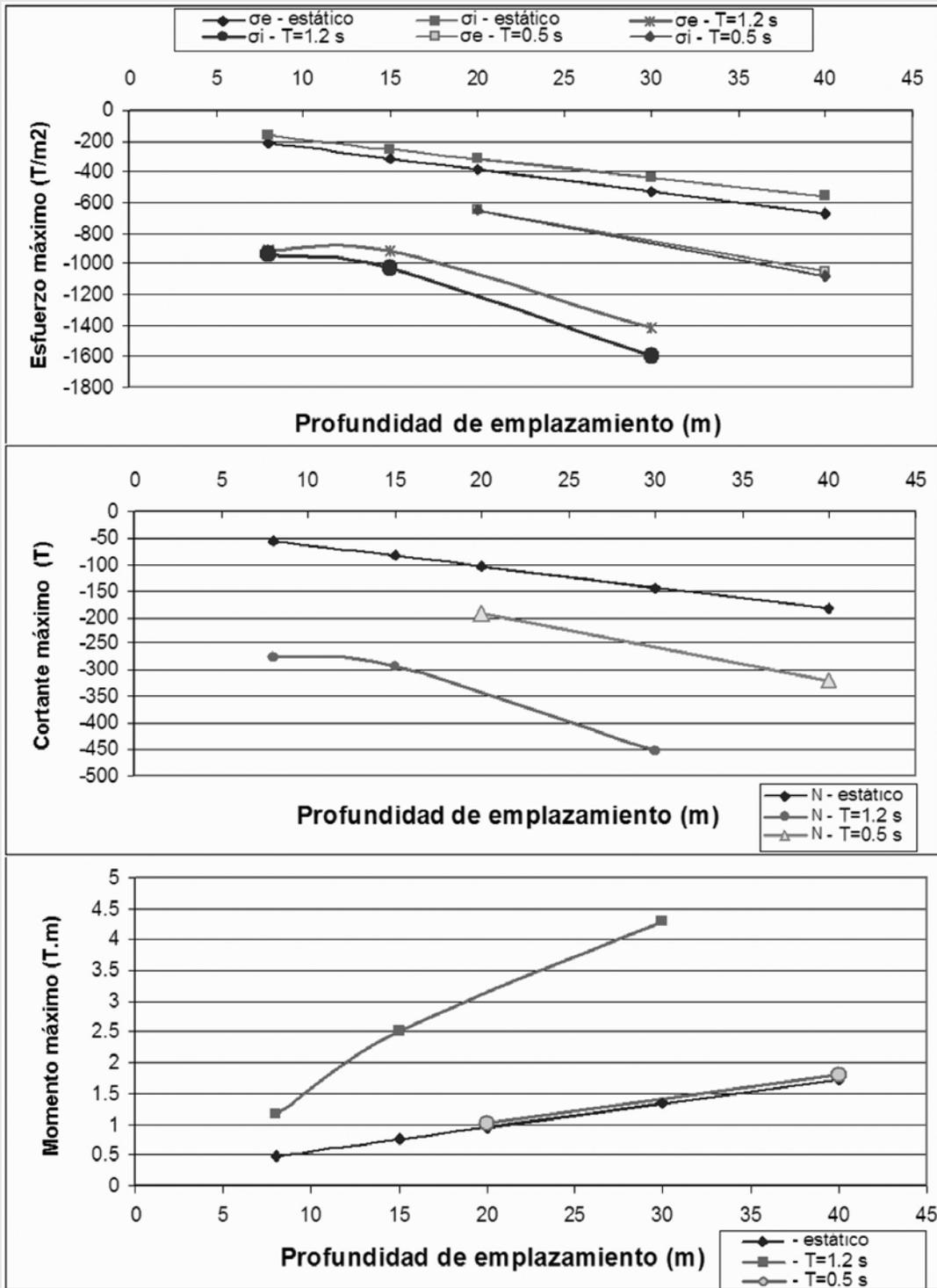
Analizando las gráficas del cambio en el estado de esfuerzos de la sección en diferentes profundidades de emplazamiento, se puede observar que bajo la acción de un sismo con $T=0.5$ s, los momentos máximos en la estructura no se modifican notablemente.

Los resultados muestran que bajo cargas sísmicas aplicadas a la sección, la profundidad de emplazamiento juega un importante rol en la respuesta de la estructura ante el evento sísmico. Si se considera una profundidad media de emplazamiento de $Z_r = 20$ y bajo la acción de un sismo caracterizado por un período de vibración de $T=1.2$ s, los esfuerzos máximos en el contorno de la estructura alcanzan los valores de $\sigma_{e\max} = -1100$ Ton/m² y $\sigma_{i\max} = -1200$ Ton/m², y producen una carga cortante máxima $V_{\max} = -350$ Ton y un momento $M_{\max} = 3$ Ton·m en la sección.

EFEECTO DEL RADIO DE LA SECCIÓN (R) SOBRE EL ESTADO DE ESFUERZOS DE LA SECCIÓN

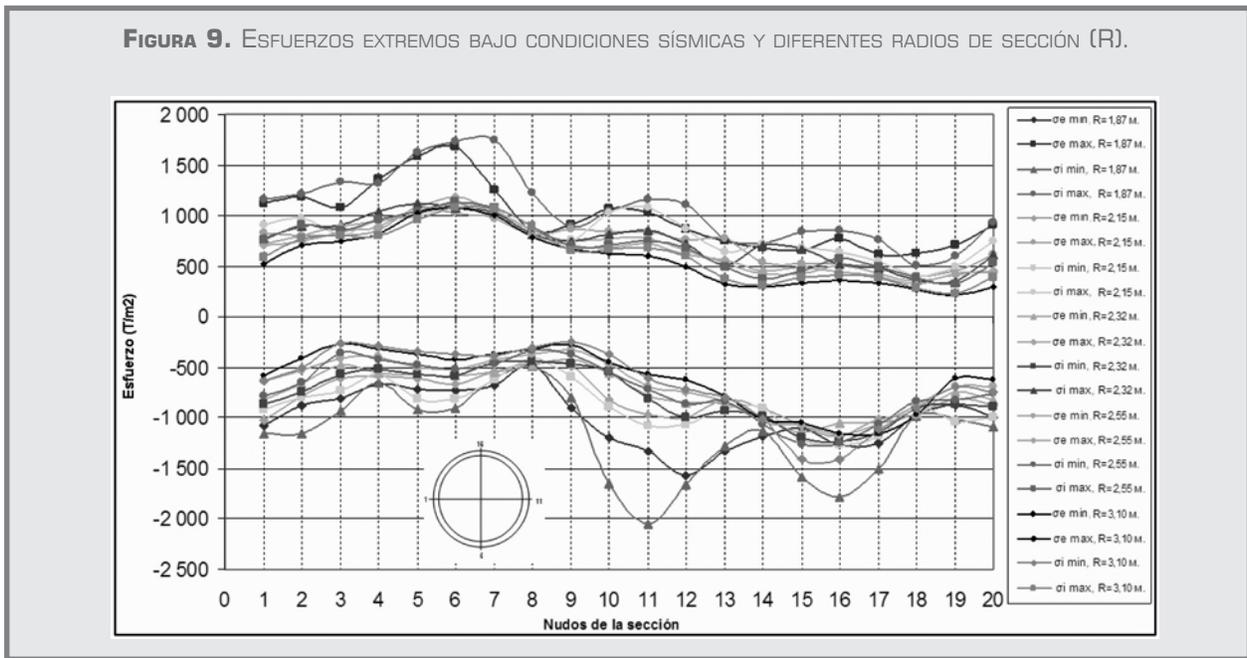
En este análisis se adoptaron cinco valores para el radio de la sección: 1.87; 2.15; 2.32; 2.55 y 3.10 m, con espesores de pared $t_0 \approx R/10$. La profundidad de emplazamiento se fijó en 20 m, el período de vibración del sismo en 1.2 s, y la profundidad del nivel freático en 6 m.

FIGURA 8. RELACIÓN GRÁFICA ENTRE LA PROFUNDIDAD DE EMPLAZAMIENTO Y EL ESTADO DE ESFUERZOS DE LA SECCIÓN.



Del análisis de las envolventes de esfuerzos máximos en la sección $\sigma_{e\max}$, $\sigma_{i\max}$ (Figura 9) durante el evento sísmico se puede concluir que, el aumento de la dimensión de la sección produce una importante disminución de los esfuerzos en todos los nodos en que se dividió el contorno de la estructura, esto respalda la hipótesis de la existencia de una relación entre las dimensiones de la estructura y las características del

espectro sísmico. Por ejemplo, para el nudo 11 de la sección, en donde el cálculo arroja los esfuerzos máximos en el contorno, con un aumento del radio de la sección de 1.87 m a 2.55 m, la disminución en los esfuerzos es del 52%, y con un incremento hasta $R= 3.10$, los esfuerzos se reducen hasta un 88%, (Figura 10.a).

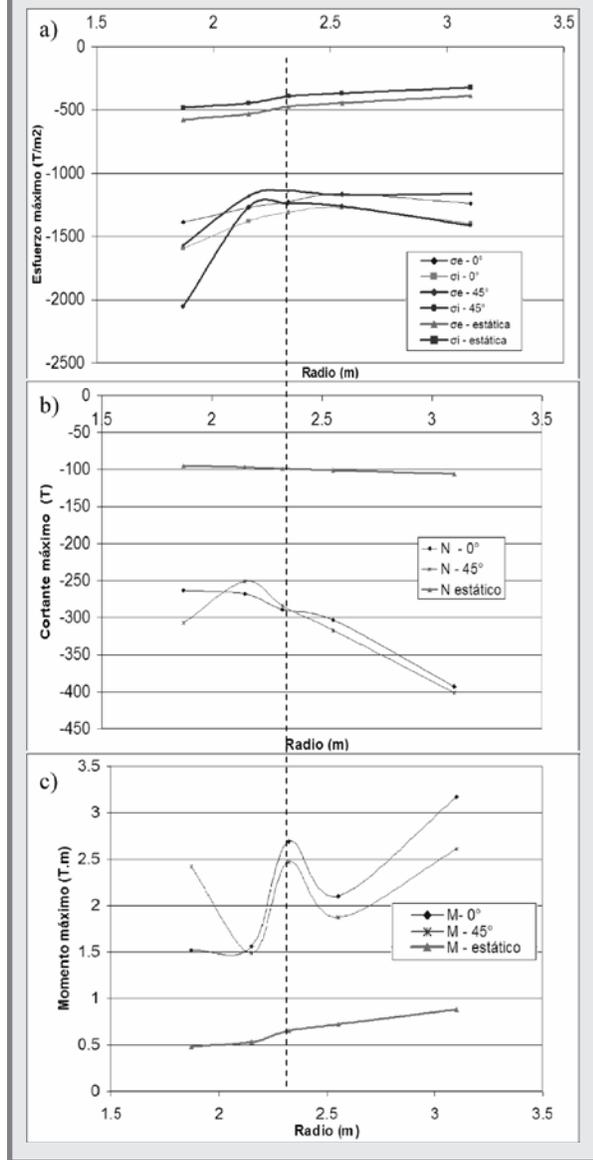


El análisis de los resultados gráficos del cambio en el estado de esfuerzos de la sección bajo condiciones sísmicas y variando su radio interno, muestra que los esfuerzos máximos cambian a medida que se aumenta el valor de R, se observa el siguiente comportamiento: al pasar de un radio de 1.87 m a uno de 2.15 m se produce una fuerte disminución en el esfuerzo máximo en la sección, así: para el caso de un frente de onda con $\theta=45^\circ$, el esfuerzo máximo en el contorno interno de la estructura pasa de $\sigma_{i\max} = -2053 \text{ Ton/m}^2$ a -1267 Ton/m^2 y en el contorno externo de $\sigma_{e\max} = -1569 \text{ Ton/m}^2$ a -1180 Ton/m^2 , y a partir de un valor de 2.15 m y continuando el incremento de R hasta los 3.10 m, los cambios en los esfuerzos no sobrepasan un 10%.

También se puede observar que a medida que aumenta el radio de la sección, se incrementa la fuerza normal en la sección (Figura 10.b), y los valores de momentos presentan una relación mucho más compleja ante el cambio en la magnitud de R. Pero en este caso en particular se obtuvo un valor mínimo de momento máximo cuando el valor de R alcanzó 2.15 m (Figura 10.c).

Pese a que para este factor se presentan gráficas de relaciones del estado de esfuerzos algo complejas, se puede observar que la dimensión de la sección tiene un efecto importante sobre el estado de esfuerzos de la estructura y se podría pensar en que existe una dimensión óptima, que hace que la estructura perma-

FIGURA 10. RELACIÓN GRÁFICA ENTRE EL RADIO DE LA SECCIÓN DEL TÚNEL Y SU RESPUESTA DE TRABAJO



nezca en un estado medio de comportamiento rígido y flexible ante determinadas características del evento sísmico; por ejemplo, para éste caso en particular el radio óptimo en que se minimizan los esfuerzos, la fuerza normal y el momento en el contorno de la estructura correspondería a un radio cercano a 2.15 m.

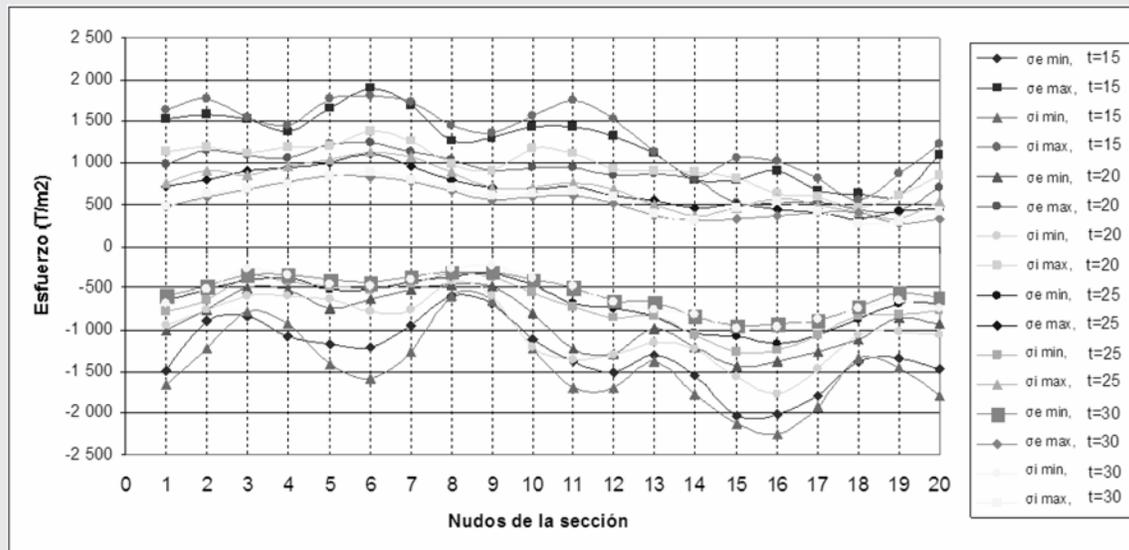
EFFECTO DEL ESPESOR DE PARED DE LA SECCIÓN SOBRE SU ESTADO DE ESFUERZOS

Se modeló una sección de radio de 2.55 m, profundidad de emplazamiento de 20 m, nivel freático a 6 m y período de vibración de 1.2 s. Fueron estudiadas cuatro variaciones del espesor de pared de la sección: 15, 20, 25 y 30 cm, que corresponden a una relación comprendida entre $5.9\% \leq R/t_o \leq 11.7\%$

Los resultados de todas las variantes de esta serie de cálculos, permiten constituir un escenario del comportamiento de la sección con diferentes espesores de pared bajo la acción de la carga sísmica. La envolvente de esfuerzos máximos en la sección muestra que el aumento en el espesor de pared repercute en una disminución de los esfuerzos en todos los nodos de la sección. Así para un frente de ondas con un ángulo de ataque de 45° , en el nodo N° 16 donde se alcanzó el máximo valor de esfuerzo en la sección con un espesor de pared de 15 cm (que corresponde a una relación $R/t_o = 5.9$), si se pasa a un espesor de 20 cm (que corresponde a una relación $R/t_o = 7.8$), el valor del esfuerzo en el contorno interno σ_i disminuye en aproximadamente 22%, y con un espesor de 30 cm (que corresponde a una relación $R/t_o = 11.7$) se reduce hasta en un 57%, al igual los esfuerzos en el contorno externo σ_e disminuyen en un 31 y 54% respectivamente (Figura 11).

Analizando el efecto del cambio en el espesor de la pared sobre el estado de esfuerzos de la sección se puede concluir que el valor de los esfuerzos máximos en la sección drásticamente se reducen al aumentar el espesor de su pared; en especial, considerando un ángulo de ataque del frente de onda de 0° (Figura 12.a); sin embargo, los demás parámetros del trabajo de la sección no sufren cambios importantes, así se observa que las fuerzas cortantes en el contorno no se reducen significativamente (Figura 12.b) y los momentos máximos aumentan pero en porcentajes bajos (Figura 12.c).

FIGURA 11. ESFUERZOS EXTREMOS BAJO CONDICIONES SÍSMICAS Y DIFERENTES ESPESORES DE REVESTIMIENTO (t_0)



En resumen, los resultados de ésta etapa de cálculos demuestran que, bajo la acción de cargas sísmicas en la sección, su espesor de pared significativamente interviene en el estado de esfuerzos sobre la estructura, en comparación con los otros parámetros analizados. Así mismo, se ha observado que existe un valor óptimo de espesor donde el trabajo de la sección se estabiliza, se puede pensar que este valor, corresponde a una relación no menor a $t_0 \geq R/10$.

EFFECTO DE LA EXISTENCIA DE SOBRECARGAS EN SUPERFICIE SOBRE EL ESTADO DE ESFUERZOS DE LA SECCIÓN

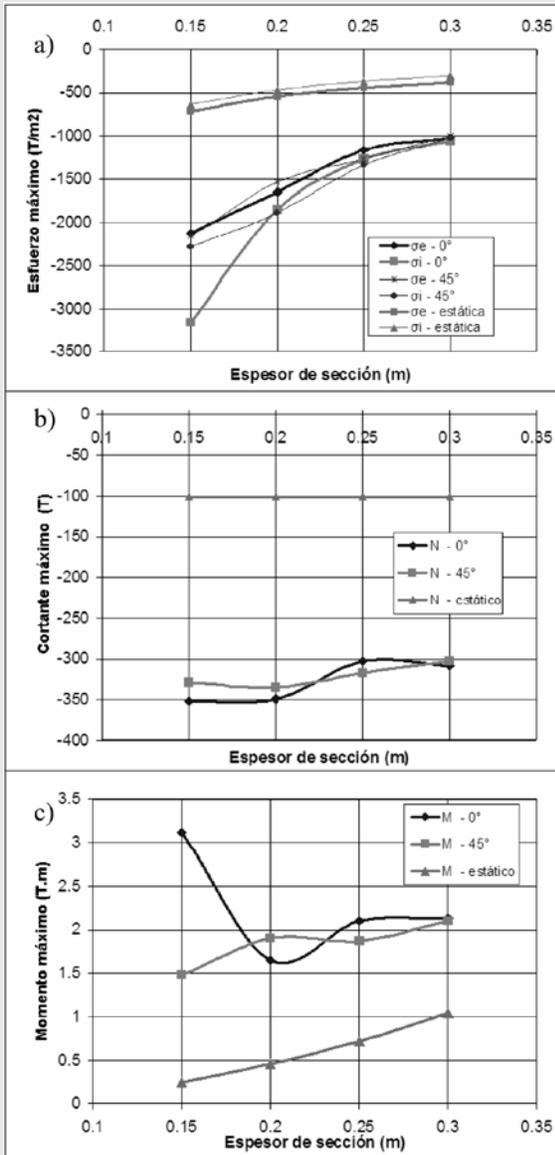
Finalmente, se realizó el cálculo de la estructura de la sección con la existencia de una carga estática en superficie a lo largo del trazado del túnel. Para los cálculos se modelo una sección de radio 2.55 m con espesor de pared de 0.25 m, emplazada a una profundidad de 8 m, con una tabla de nivel freático a una profundidad de 6 m y un período de vibración sísmica de 1.2 s idealizando la onda sísmica con una forma exponencial del espectro y con una carga uniformemente distribuida de 2 Ton/m² en 10 m a lado y lado del eje del túnel.

Para determinar el efecto de la carga repartida en superficie sobre el trabajo de la sección ante un evento sísmico, fueron construidas y analizadas las gráficas de cambio de los esfuerzos máximos, (Figura 13.a), de las fuerzas normales máximas (Figura 13.b) y también de los momentos máximos en la sección (Figura 13.c).

Se puede observar que, en el caso de la existencia de la sobrecarga en superficie y bajo la acción sísmica, el esfuerzo máximo en la sección se incrementa en aproximadamente un 8% y la magnitud de la máxima fuerza normal aumenta en aproximadamente un 12%. Entre tanto, el valor de los momentos máximos en la sección aumenta de un estado estático de 0.35 T.m² a 0.41 T.m², pero bajo condiciones sísmicas la existencia de la sobrecarga en superficie influye de manera positiva pues el momento máximo disminuye de 1.53 T.m² a 1.49 T.m² con un ángulo de ataque del frente de onda de 0°, y con un ángulo de 45° se reduce aún más de 1.53 T.m² a 1.16 T.m², que corresponde a una disminución de esfuerzos de 24%.

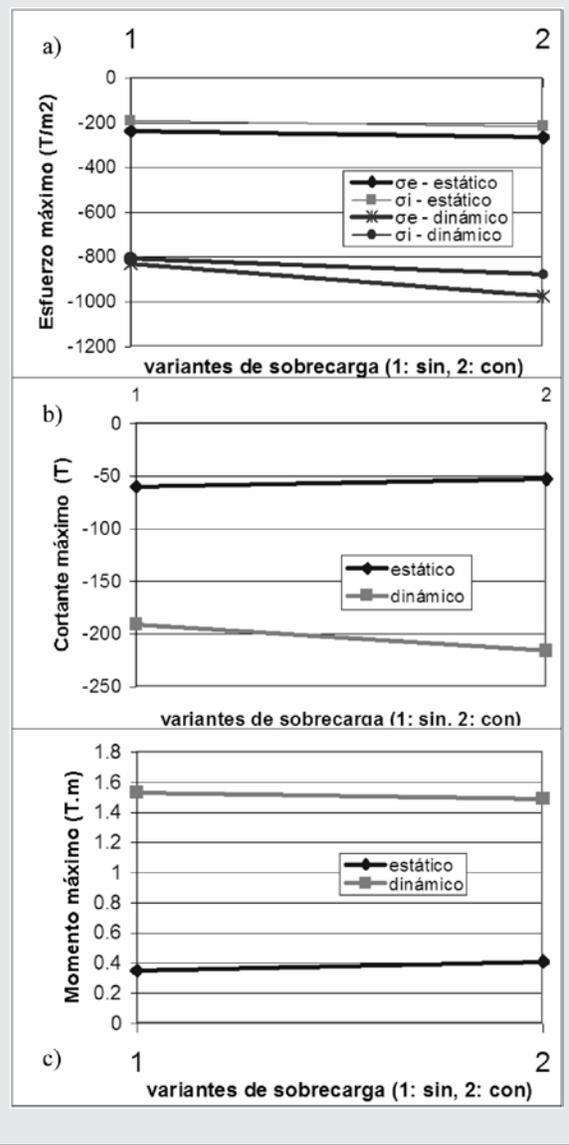
De esta manera, ante un evento sísmico, una sobrecarga a lo largo del trazado del túnel tiene un efecto

FIGURA 12. RELACIÓN ENTRE EL ESPESOR DE PARED DE LA SECCIÓN Y SU RESPUESTA ANTE EL SISMO



positivo sobre el estado de esfuerzos de la sección. Esto significa que, durante las etapas de diseño en túneles no profundos se puede proyectar el uso de una carga adicional en superficie, la cual no afecta significativamente el trabajo de la estructura subterránea en condiciones estáticas pero bajo la acción sísmica disminuye notablemente los esfuerzos en la sección.

FIGURA 13. COMPORTAMIENTO DE LA SECCIÓN CON LA EXISTENCIA DE SOBRECARGA EN SUPERFICIE



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos por la presente investigación analítica concuerdan con otras desarrolladas con diferentes métodos de cálculo del efecto sísmico en estructuras subterráneas; por ejemplo, los desarrollos de Fotieva (1980), Wang (1993), Power *et al.*

(1996), Joussef *et al.* (2001) y Torres (2004) y mediciones en campo de estructuras subterráneas atacadas por sismos (Masanov *et al.*, 1988). Se puede afirmar que el método hidrodinámico permite calcular, fácilmente y con un buen grado de confiabilidad, el estado de esfuerzos para una estructura subterránea emplazada cerca de la superficie, en un suelo de las características aquí definidas y bajo una fuerte acción sísmica teniendo en cuenta las propiedades físicas no lineales del suelo y de la geometría de la estructura.

El efecto de la forma de onda sísmica se valoró como despreciable sobre los esfuerzos en la sección, para todas las formas del espectro analizadas se encontró que el esfuerzo máximo en el contorno externo de la sección aumento 2.6 veces que en estado estático y en el contorno interno en 3.7 veces, esto puede explicarse por la profundidad de emplazamiento de la sección y la relación entre las rigidez de los materiales de la estructura y del suelo a su alrededor, y también de los parámetros utilizados del espectro de onda del evento sísmico.

La influencia del período de vibración T sobre el estado de esfuerzos de la sección analizada es de un grado alto. El incremento en los esfuerzos máximos en la sección es directamente proporcional al aumento del período de vibración del sismo, en concordancia con las leyes fundamentales de la mecánica de ondas.

El efecto del ángulo de ataque del frente de onda θ sobre el estado de esfuerzos de la sección no es significativo. La diferencia máxima entre las variaciones analizadas no superó el 1%, esto se puede explicar porque relativamente las dimensiones de la estructura son mucho más pequeñas que las características geométricas de la onda sísmica, la cual actúa prácticamente de inmediato sobre todo el contorno del túnel de tal manera que el ángulo de ataque del frente de onda no tiene una influencia importante en la presión desarrollada.

La profundidad de emplazamiento Z_r tiene un grado importante de influencia sobre la respuesta de la estructura ante un evento sísmico. Así, se observó que bajo la acción del sismo para el modelo estudiado con una profundidad de emplazamiento de 8 m, el esfuerzo máximo sobre el contorno del túnel aumenta en un 300% con relación a las condiciones estáticas, al tiempo que, para una profundidad de 30 m, aumenta sólo un 60%. Este comportamiento concuerda con observaciones realizadas en campo y con los resultados de diferentes autores, Barton (1984), Masanov *et al.* (1988) y Dorman (2002).

El efecto del radio de la sección R sobre su estado de esfuerzos es complejo. Sin embargo, el análisis de los resultados permite establecer, que para el espectro de onda utilizado y con las condiciones del suelo y de la estructura establecidas en el presente modelo, existe un valor óptimo para el radio de la sección con el cual se obtiene una mejor reacción de la sección ante el evento sísmico. Particularmente para la presente investigación se tiene que el valor óptimo para el radio se encuentra entre $2.15 \text{ m} \leq R \leq 2.55 \text{ m}$, respetando siempre la relación $t_0 \approx R/10$.

El espesor de la pared del túnel t_0 tiene un efecto significativo en el estado de esfuerzos de su estructura. Ante un cambio de espesor de pared de 15 cm a 20 cm el esfuerzo máximo en el contorno interno de la sección σ_i disminuye en un 22% y en el contorno externo σ_e baja en un 31%. A su vez, aumentando el espesor hasta alcanzar los 30 cm, el esfuerzo máximo en el contorno interno de la sección σ_i disminuye en un 57% y en el contorno externo σ_e baja en un 54%.

El efecto de una sobrecarga en superficie es positivo para el estado de esfuerzos de la estructura subterránea ante el evento sísmico. Los resultados muestran que la disminución en el valor máximo de los momentos en la sección alcanzo un valor del 24%.

Finalmente, se concluye que de siete parámetros analizados el período de vibración de la onda sísmica T y el espesor de pared t_0 , son los que mayor influencia tienen en el comportamiento de la estructura subterránea ante un evento sísmico.

Es evidente que para constituir una adecuada normatividad para la construcción de obras subterráneas, en un contexto particular se deberán establecer con antelación mediante estudios los espectros sísmicos en los estratos, en donde se puedan aproximar adecuadamente los valores del período de vibración, velocidad de onda y de vibración de las partículas.

BIBLIOGRAFÍA

Adler Y.P., Makarova E.B., Granovsky Y.V. *Planeación de experimentos en busca de condiciones óptimas*. Moscú: Editorial Nauta, 1976.

Barton N. "Effects of rock mass deformation on tunnel performance in seismic regions. Túnel". *Technol. & subserf. Use.* 3. 4. (1984): 16 - 20.

Dorman I.Y. *Medidas antisísmicas en túneles de transporte*. Moscú: Ministerio de Transporte de la Federación Rusa. 2002.

Fotieva N.N. *Cálculo del refuerzo de construcciones subterráneas en zonas activamente sísmicas*. Moscú: Editorial Nedra, 1980.

Limanov Y.A. y Svitin V.V. "Método hidrodinámico para el cálculo de construcciones subterráneas bajo acción sísmica". *Construcción del Transporte* 5. Moscú: Editorial Transporte, 1989.

Masanov LL., Baymakhanov, I. B. y Makhmetova N.M. *Reacción de una estación de metro en un suelo no homogéneo bajo acción sísmica*. Mecánica de construcciones subterráneas. Tula. 1988.

Los presentes resultados demuestran que es posible realizar estimaciones analíticas simples, pero importantes, durante las fases de diseño de cualquier estructura subterránea que potencialmente pueda experimentar sobrepresiones por eventos sísmicos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece profundamente la asesoría en el proceso de cálculos al Doctor Valeriy V. Svitin de la Universidad Estatal de vías de Comunicación de San Petersburgo – Federación Rusa. En especial, por su valioso aporte en la revisión del presente artículo a Lidiya Kravchenko y Andrés José Alfaro.

NSR-98, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. 1999, AIS – Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Okamoto S., *Introduction to earthquake engineering*. Tokio: University of Tokyo Press, 1973.

Power, M., Rosidi, D. y Kaneshiro, J.. "Seismic vulnerability of tunnels-revisited". Ozedimir, L., (ed.). *Proceedings of the North American Tunneling Conference*. USA.: Elsevier, Long Beach, CA, 1998

Svitin V.V. *Sismoresistencia de túneles para transporte y de sección circular en suelos no cohesivos, PGUPS*. San Petersburgo: s.e., 1987.

Svitin V.V. *Manual de referencia Programa VOLNA® – versión 5.0*. PGUPS. San Petersburgo: s.e., 1994.

Torres, P. "Consideraciones de la respuesta de túneles profundos construidos en suelos blandos ante un evento sísmico". *Revista Asociación de ingenieros civiles de la Universidad Nacional de Colombia* 33. (2004): 17 - 24.

Torres, P. “Fundamentos de las soluciones constructivas y tecnológicas para los túneles del metro en la ciudad de Bogotá (Colombia)”. Tesis doctoral para optar por el título de Ph.D. en ciencias técnicas en la especialidad de diseño y construcción de caminos, aeródromos, puentes, metropolitanos y túneles de transporte, 2004.

Wang, J.-N., *Seismic Design of Tunnels: A State of the Art Approach*, monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc, New Cork, 1993.

Youssef M.A. Hooqa J.J., Schmidt B. y Chiang Yoa J. I. “Seismic design and analysis of underground structures”. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 16. (2001): 247 - 293.