



Ciencia en su PC

ISSN: 1027-2887

manuela@megacen.ciges.inf.cu

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago
de Cuba

Cuba

Saint Felix-López, Nelson; Rondón-Aguilar, Jorge
**Procedimiento para el análisis sísmico de túneles de
hormigón armado mediante el método de elementos finitos**
Ciencia en su PC, vol. 1, núm. 1, 2021, -Marzo, pp. 1-12
Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba
Santiago de Cuba, Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181368034001>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Procedimiento para el análisis sísmico de túneles de hormigón armado mediante el método de elementos finitos

Procedure for the seismic analysis of reinforced concrete tunnels using the finite elements method

Autores:

Nelson Saint Felix-López, nelsonsaint@uo.edu.cu. Universidad de Oriente,
Facultad de Construcciones. Teléfono: 22642908. Santiago de Cuba, Cuba.

Jorge Rondón-Aguilar, jorgerondon@nauta.com.cu. Empresa de Servicios de
Ingeniería y Diseño, CREAMQ. Bayamo, Granma, Cuba.

RESUMEN

Teniendo en cuenta la susceptibilidad que poseen los túneles de hormigón armado, desplantados en suelo blando, de sufrir algún nivel de daño ante las acciones sísmicas y las incertidumbres existentes en el comportamiento dinámico de los mismos, se presentó un procedimiento de análisis basado en el uso del método de elementos finitos (MEF), el cual tuvo en cuenta las deformaciones que se producen en el suelo como consecuencia de la acción sísmica. El análisis que se desarrolló permite la obtención de los estados tenso-deformacionales que se producen en la estructura del túnel como consecuencia de la acción sísmica, los cuales son comparados con el procedimiento cinemático para el análisis sísmico de túneles.

Palabras clave: túnel, suelo blando, análisis sísmico, resortes, desplazamiento, parámetros.

ABSTRACT

Taking into account the susceptibility of reinforced concrete tunnels, set in soft soil, to suffer some level of damage from seismic actions and given the existing uncertainties in their dynamic behavior; An analysis procedure based on the use of the finite element method (FEM) is presented, which takes into account the deformations that occur in the ground as a consequence of seismic action. The analysis that is developed allows obtaining the stress-deformation states that occur in the tunnel structure as a consequence of the seismic action, which are compared with the kinematic procedure for the analysis tunnel seismic.

Keywords: tunnel, soft soil, seismic analysis, spring, displacements, parameters.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se han documentado numerosos casos en los que se han producido daños en túneles, bien por colapso o bien por fisuración del revestimiento. Autores, tales como, Asakura et al. (1998), El-Nahhas et al. (2006), Kontogianni y Stiros (2003), Lanzano et al. (2008), Wang et al. (2001), Yashiro et al. (2007), entre otros, han puesto de manifiesto la vulnerabilidad de los túneles ante eventos sísmicos.

Aun cuando las estructuras subterráneas son menos vulnerables a los movimientos sísmicos que las estructuras superficiales, es necesario garantizar su seguridad ante los movimientos sísmicos del terreno (Avilés y Pérez, 2014). Esto se debe a que dichas estructuras se encuentran limitadas por el medio que las rodea, de modo que es poco probable que puedan moverse de forma significativa, independiente del medio, o ser sometidas a amplificación de la vibración producida por ondas sísmicas (Dowding & Rozen, 1978).

Por tal motivo, durante mucho tiempo la mayor parte de los túneles se ha diseñado y construido sin tomar en cuenta los efectos sísmicos. Solo a partir de los años 60 fueron incorporados por primera vez procedimientos de diseño sísmico en proyectos subterráneos (Wang, 1993).

En los últimos años se han desarrollado diversos estudios encaminados a determinar los factores que influyen en el comportamiento de las estructuras subterráneas (Wang, 1993), con lo cual se ha logrado establecer una filosofía de diseño sísmico para el caso de los túneles, que tiene como propósito dar a la estructura la capacidad para soportar las cargas de desplazamiento o deformación que se les aplican (González, 2016).

Las metodologías de diseño de estructuras subterráneas que se utilizan en la actualidad están basadas principalmente en métodos de análisis cuantitativos, ya que los avances en el desarrollo de *software* para modelos de elementos o diferencias finitas han propiciado nuevas herramientas que permiten evaluar la respuesta sísmica de estas estructuras (Solans et al., 2014).

MATERIALES Y MÉTODO

La investigación comprendió las siguientes fases:

- Análisis de la evolución histórica de los estudios realizados referentes al análisis dinámico de túneles de hormigón armado, sometidos a carga sísmica; además, se precisaron y valoraron las tendencias actuales y las herramientas metodológicas existentes para el análisis dinámico de este tipo de estructuras.
- Identificación y selección de los parámetros que caracterizan el comportamiento dinámico de túneles de hormigón armado, desplantados en suelo blando, ante las acciones sísmicas.
- Propuesta de un procedimiento, basado en el uso de elementos finitos, para el análisis dinámico de túneles de hormigón armado, emplazados en suelo blando, para zonas de mediana y alta peligrosidad sísmica de Cuba.

RESULTADOS

A partir del procedimiento propuesto, el cual permite la obtención de parámetros de respuesta, tales como estados tensionales, deformacionales y fuerzas resultantes, es posible evaluar el comportamiento dinámico de túneles de hormigón armado desplantados en suelo blando, ubicados en zonas de mediana y alta peligrosidad sísmica de Cuba; así como caracterizar la respuesta dinámica de estos ante las acciones sísmicas, además de servir como herramienta en la elaboración de planes de prevención y mitigación de desastres en los que se involucren este tipo de estructuras.

Dado que las acciones de diseño para estructuras subterráneas suelen ser expresadas en términos de las deformaciones impuestas a la estructura por el movimiento del suelo, Avilés y Pérez (2014) desarrollaron un método de interacción dinámica entre el suelo y la estructura del túnel; asimismo, establecieron criterios de diseño basados en el cálculo de los valores estáticos del cortante y momento, multiplicados por factores de amplificación que consideran el efecto dinámico del suelo.

Entre los diversos enfoques utilizados para el diseño de túneles, el más sencillo es el que ignora la interacción del túnel con el suelo circundante. En estas condiciones primero se estiman las deformaciones del terreno en campo libre y luego el túnel se diseña para acomodarse a estas deformaciones.

Luego, el procedimiento que se presenta para el análisis estructural de túneles en suelo blando se sustenta en la elaboración de un modelo de cálculo, basado en el método de elementos finitos, que toma en cuenta las deformaciones longitudinales y transversales de la estructura, así como la flexibilidad del suelo. Dicha flexibilidad es introducida utilizando en concepto de resortes elásticos, el cual permite conectar la geometría del túnel con el medio circundante. En la base de dichos resortes se imponen los desplazamientos sísmicos de campo libre del suelo, relativos a la base de la estructura, con lo cual se representa la acción sísmica.

En términos generales el procedimiento propuesto consta de tres fases fundamentales: (1) deducción del desplazamiento máximo del terreno y la estimación de las rigideces axial y lateral del suelo, (2) elaboración de un modelo de cálculo, basado en el uso de elementos finitos; (3) control de los estados límites de servicio y falla.

En la primera fase o etapa del procedimiento se realiza la deducción del desplazamiento máximo del terreno (ecuaciones 1 y 2) y la estimación de las rigideces axial y lateral del suelo (ecuación 4), basadas en el procedimiento simplificado de Avilés y Pérez (2014) para el diseño de túneles en suelo blando.

$$\text{Deformación axial: } D_s = \frac{v_s L_s}{2\pi C_e C_s} \quad (1)$$

$$\text{Deformación flexionante: } D_s = \frac{A_s L_s^2}{4\pi^2 (C_k C_s)^2} \quad (2)$$

Donde la velocidad efectiva de propagación (C_s) se determina de acuerdo con la ecuación 3, dependiente de la profundidad del depósito de suelo (H_s) y del valor del período dominante del suelo (T_s).

$$C_s = \frac{4H_s}{T_s} \quad (3)$$

La longitud de onda dominante (L_s) se puede estimar de forma razonable a través de la ecuación 4.

$$L_s = T_s C_s \quad (4)$$

Los coeficientes de deformación (C_ϵ) y curvatura (C_k) del terreno pueden ser tomados de la tabla 1, según el tipo de onda considerada.

Tabla 1. Coeficientes de deformación y curvatura del terreno			
Tipo de coeficiente	Ondas S	Ondas P	Ondas Rayleigh
C_ϵ	2 ($\theta = 45^\circ$)	1 ($\theta = 0^\circ$)	1 ($\theta = 0^\circ$)
C_k	1 ($\theta = 0^\circ$)	1.6 ($\theta = 35^\circ$)	1 ($\theta = 0^\circ$)

Fuente: Avilés y Pérez, 2014

Las rigideces axial y lateral del suelo, por unidad de longitud de túnel, se determinan de acuerdo con la ecuación 5.

$$K_a = K_l = \frac{16\pi G_s (1 - \nu_s)}{3 - 4\nu_s} \cdot \frac{d}{L_s} \quad (5)$$

Donde: G_s : módulo de cortante del suelo, d : diámetro del túnel, L_s : Longitud de onda dominante y ν_s : Coeficiente de Poisson del suelo.

En la segunda fase o etapa del procedimiento se desarrolla un modelo matemático con la ayuda del *software* profesional SAP2000 v20.2.0, teniendo en cuenta las invariantes de la modelación mecánica y el análisis estructural (geometría, materiales, cargas actuantes y vínculo de la estructura con el suelo). En esta fase se introduce en la estructura el concepto de los resortes elásticos para la modelación de la conexión de la estructura con el medio circundante, a partir de los valores de rigideces definidos en el paso anterior y la imposición de las deformaciones axial y de flexión respectivamente.

Para determinar los estados de cargas actuantes, se sugieren las recomendaciones del Código AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2017).

En la tercera fase, que tiene en cuenta el control de los estados límites de servicio y falla, se revisan los desplazamientos máximos que se manifiestan como consecuencia de las acciones impuestas; igualmente, se chequean los estados límites de flexión, flexocompresión, fuerza cortante, torsión, pandeo y, cuando sean significativos, los efectos de la fatiga.

Validación del procedimiento. Caso de estudio

Para la validación del procedimiento se realiza la modelación de un túnel elíptico a partir de los siguientes datos:

- Parámetros sísmicos: aceleración máxima del terreno ($A_s = 150 \text{ cm/s}^2$), velocidad máxima del terreno ($V_s = 45 \text{ cm/s}$).
- Parámetros geotécnicos: período dominante del suelo ($T_s = 1.25 \text{ s}$), velocidad efectiva de propagación ($C_s = 200 \text{ m/s}$), módulo de cortante del suelo ($G_s = 7340 \text{ t/m}^2$), coeficiente de Poisson del suelo ($\nu_s = 0.45$), densidad del suelo ($\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$).
- Parámetros estructurales: profundidad de enterramiento ($H = 10 \text{ m}$), longitud del túnel ($L = 30 \text{ m}$), diámetro interior del túnel ($d = 15.9 \text{ m}$), espesor del revestimiento ($t = 0.75 \text{ m}$), módulo de elasticidad del hormigón ($E_c = 28348110 \text{ kN/m}^2$), coeficiente de Poisson del hormigón ($\nu_c = 0.17$).

Fase 1: Determinación del desplazamiento máximo del terreno y estimación de las rigideces axial y lateral del suelo

De acuerdo con el procedimiento simplificado de Avilés y Pérez (2014), se determinan los valores de desplazamientos del terreno (ecuaciones 1 y 2), así como la rigidez de los resortes (ecuación 5).

- Desplazamiento máximo del terreno para deformación axial: $D_s = 4.48 \text{ cm}$
- Desplazamiento máximo del terreno para deformación de flexión:
 $D_s = 5.94 \text{ cm}$
- Rigidez axial (K_a) y lateral del suelo (K_l): $K_a = K_l = 10754.85 \text{ t/m}$

Fase 2: Elaboración del modelo de cálculo

Para la elaboración del modelo de cálculo se recurre al *software* profesional SAP2000, v.20.2.0, con el cual es posible representar la geometría del túnel de manera aproximada a la estructura real, así como la influencia del medio de sustentación mediante la inclusión de resortes elásticos, además de todos los posibles estados de cargas actuantes.

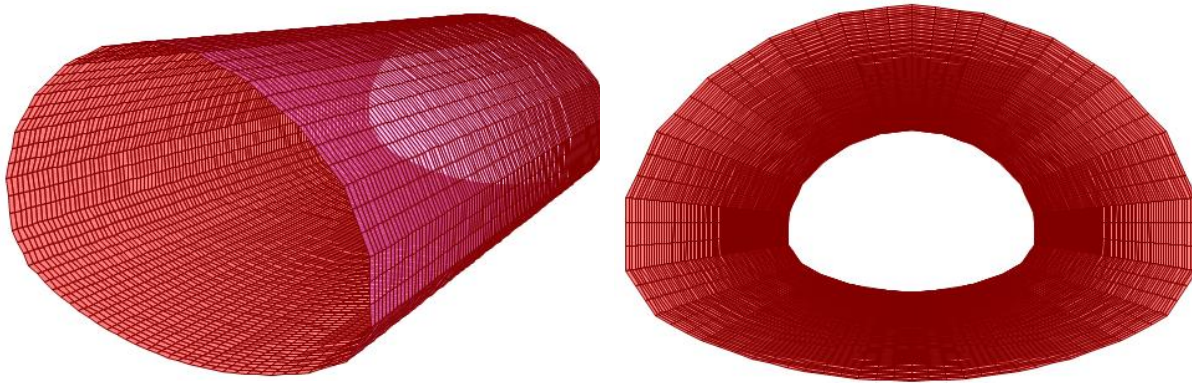
Cargas actuantes

Para la elaboración del modelo de cálculo se tuvieron en cuenta los siguientes estados de cargas: peso propio de la estructura (DC), empuje vertical de terreno (EV), empuje horizontal de terreno (EH), cargas vivas superficiales (LL), componente horizontal de las cargas vivas superficiales (LS), acción sísmica (EQ), carga muerta debido al relleno en el interior del túnel (DW) y carga viva en el interior del túnel debido al tránsito (IL). Las combinaciones de cargas a utilizar se definen en el código AASHTO, (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2017).

Modelo de la acción sísmica

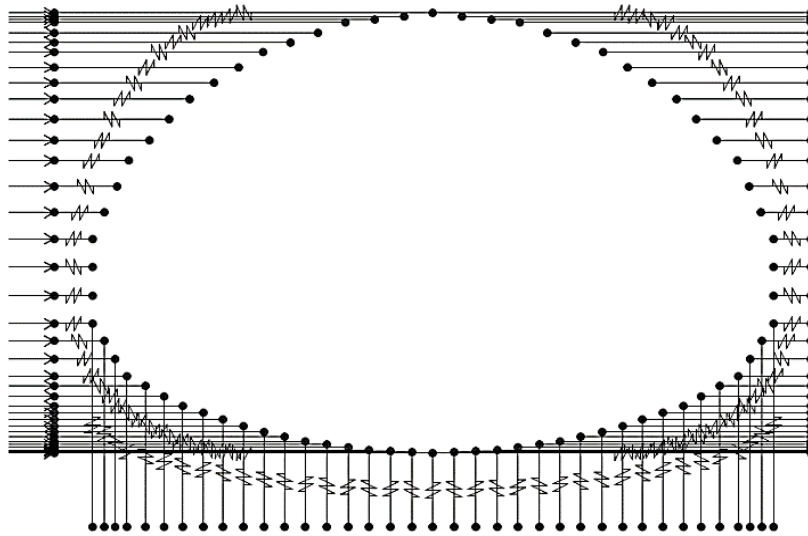
En la figura 1 se representa la sección geométrica del túnel, desarrollada mediante la utilización de elementos finitos, la cual se conecta al medio circundante (suelo) a través de resortes elásticos (figura 2) para simular la interacción de la estructura con el suelo. Se observa, además, como en la base de los resortes horizontales se imponen los desplazamientos sísmicos de campo libre del suelo, relativos a la base de la estructura.

Figura 1. Representación de la geometría del túnel



Fuente: autores

Figura 2. Esquemas de distribución de desplazamientos sísmicos



Fuente: autores

Los resortes dispuestos en el lado derecho del túnel tendrán apoyo fijo en lugar de apoyo deslizante, mientras que el desplazamiento sísmico se aplicará en los resortes del muro izquierdo. Si se invierte el sentido de la aceleración máxima, el apoyo fijo se aplicará a los resortes del muro izquierdo, mientras que el desplazamiento sísmico se aplicará, invirtiendo su dirección, en la base de los resortes del lado derecho.

Análisis de resultados

Como resultado de la modelación realizada es posible expresar en términos de esfuerzos y reacciones la respuesta que ofrece la estructura ante los estados de cargas impuestos, además de apreciar las deformaciones por flexión y ovalamiento que se producen como consecuencia de la acción sísmica.

En la tabla 2 se muestra una comparación entre algunos de los resultados derivados de la aplicación del método propuesto, respecto al procedimiento simplificado propuesto por Avilés y Pérez en 2014. Se observan variaciones que oscilan entre el 15 y el 20 %, lo cual puede considerarse adecuado si se tiene en cuenta la complejidad del modelo realizado.

Tabla 2. Comparación de resultados				
Descripción	u/m	Avilés y Pérez (2014)	SAP2000	Dif. (%)
Máxima fuerza normal circunferencial	kN	1432.4	1690.23	18.0
Máximo momento flexionante circunferencial	kN-m	883.7	748.845	15.3
Máxima fuerza cortante debida a la curvatura por flexión	kN	24769.9	29448.6	18.9
Máxima fuerza axial correspondiente a la deformación longitudinal	kN	143443	172131.1	20.0
Máximo momento flexionante correspondiente a la deformación longitudinal	kN-m	985564	831955	15.6

Fuente: autores

CONCLUSIONES

1. La realización de modelos basados en la utilización del método de elementos finitos (MEF), con la incorporación de los efectos de iteración suelo-estructura,

- ha permitido la validación de los resultados propuestos por Avilés y Pérez (2014) y su verificación, con una buena aproximación numérica.
2. Los resultados obtenidos, a partir del modelo realizado mediante MEF, están en concordancia con las fallas típicas observadas en este tipo de estructura ante la acción de eventos sísmicos significativos; asimismo, se encontraron puntos críticos con concentración de tensiones y deformaciones en zonas donde se evidencian estas fallas descritas por la bibliografía.
 3. El procedimiento que se presenta es aplicable a diversas condiciones de emplazamiento del túnel, condiciones de sustentación y profundidad del mismo. Con este se obtuvo una mayor precisión en la determinación de la respuesta de la estructura, lo cual permitió el análisis estructural de túneles de alta complejidad en cuanto a geometría y condiciones de suelo.
 4. El procedimiento propuesto integra dos de los métodos más utilizados para de evaluación de estructuras subterráneas: el método de deformación campo libre y el de interacción suelo-estructura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2017) *LRFD Road Tunnel Design and Construction guide specifications*. <https://store.transportation.org/Common/DownloadContentFiles?id=1586&AspxAutoDetectCookieSupport=1>
- Asakura, T., Akojima, Y., Luo, W., Sato, Y., & Yashiro, K. (1998). Study on earthquake damage to tunnels and reinforcement of portals. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 39(1), 17-22. <http://www.rtri.or.jp/eng/>
- Avilés y Pérez R. (2014). Criterios de diseño sísmico de túneles. *Tecnología y Ciencias del Agua*, V(1, enero-febrero), 57-70. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000100004&lng=es&tlng=es
- Dowding, C.H. & Rozen, A. (1978). Damage to Rock Tunnels from Earthquake Shaking. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 104(29), 175-191. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000580>

El-Nahhas, F.M., Abdel-Motaal, M.A., & Khairy, A.T. (8-9 november, 2006). Engineering safety of tunnels during earthquakes. In *Workshop on Safety in Tunnels and Underground Structures* (pp. 59-73), Riyadh. https://www.academia.edu/download/39587447/ENGINEERING_SAFETY_OF_TUNNELS_DURING_EAR20151101-30237-j6i9us.pdf

González Fuentes, S.I. (2016). *Análisis del comportamiento de túneles excavados en roca ante cargas sísmicas mediante modelamiento numérico* (Tesis presentada en opción al título de Geólogo). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología. Chile. repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/141112/Analisis-del-comportamiento-de-tuneles-excavados-en-roca-ante-cargas-sismicas-mediante-modelamiento-numerico.pdf?sequence=1

Kontogianni, V.A., & Stiros, S.C. (2003). Earthquakes and seismic faulting: effects on tunnels. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 12(1), 153-156. <https://journals.tubitak.gov.tr/earth/abstract.htm?id=6051>

Lanzano, G., Bilotta, E., & Russo, G. (2008). *Tunnels under seismic loading: a review of damage case histories and protection methods*. Department of Hydraulic, Geotechnical and Environmental Engineering (DIGA). University of Naples Federico II, Italy and SAVA Department, University of Molise, Campobasso, Italy <http://www.reluis.it/doc/pdf/Pubblicazioni/Lanzano-Bilotta-Russo.pdf>

Solans, D, Hormazábal, C., Rojas, B. y León, R. (2014). Comparación de tres metodologías de análisis sísmico de túnel NATM en suelos finos de Santiago. *Obras y proyectos*, 17, 14-21. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132015000100002>

Wang, J.N. (1993). *Seismic Design of Tunnels, A State-of-the-Art Approach* (Monograph 7). Nueva York: Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc. <http://cdn.wspgroup.com/8kzmue/seismic-design-of-tunnels-a-simple-state-of-the-art-design-approach.pdf>

Wang, W.L., Wang, T.T., Su, J.J., Lin, C.H., Seng, C.R., & Huang, T.H. (2001). Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake. *Tunnelling and underground space technology*, 16(3), 133-150. <https://scholars.lib.ntu.edu.tw/bitstream/123456789/168530/1/8.pdf>

Yashiro, K., Kojima, Y. & Shimizu, M. (2007). Historical earthquake damage to tunnels in Japan and case studies of railway tunnels in the 2004 Niigataken-Chuetsu earthquake. *Quarterly Report of RTRI*, 48(3), 136-141.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriqr/48/3/48_3_136/_pdf

Recibido: 10 de junio de 2020

Aprobado: 2 de octubre de 2020