EIEI ACOFI 2025
5º Congreso Latinoamericano de Ingeniería
Más Información: www.acofi.edu.co/eiei
Ingeniería de impacto para cuidar y transformar la vida
ACOFI: 50 años por la excelencia de la educación en ingeniería.

Efecto 3D en la respuesta sísmica no drenada de túneles

Francisco Javier Giraldo Bustamante, Eimar Andrés Sandoval Vallejo

Universidad del Valle
Cali, Colombia

Resumen

Los túneles, como estructuras subterráneas son esenciales para el transporte de vehículos de carga, pasajeros, ferroviarios y servicios públicos, diseñados tradicionalmente bajo métodos analíticos cerrados y análisis numéricos 2D pseudoestáticos y tiempo-historia, bajo supuestos de comportamiento lineal-elástico. Estas simplificaciones han sido útiles por su eficiencia, pero no representan de manera adecuada el comportamiento complejo del suelo, ni los efectos 3D presentes durante eventos sísmicos. En particular, la propagación de ondas sísmicas en las diferentes direcciones y la respuesta del suelo en condiciones drenadas o no drenadas son aspectos que suelen omitirse. Por ello, se propone la aplicación de modelos numéricos dinámicos 3D no lineales, que consideren el desarrollo de presiones de poros y la interacción suelo–estructura, lo que permitirá una evaluación más precisa en el desempeño sísmico de los túneles.

Palabras clave: túneles; respuesta sísmica; fricción relativa

Abstract

Tunnels, as subway structures essential for the transportation of freight, passenger, rail and utility vehicles, are traditionally designed under closed analytical methods and 2D pseudo-static and time-history numerical analyses, under assumptions of linear-elastic behavior. These simplifications have been useful for their efficiency, but they do not adequately represent the complex behavior of the soil, nor the 3D effects present during seismic events. In particular, the propagation of seismic waves in different directions and the response of the soil in drained or undrained conditions are aspects that are usually omitted. Therefore, the application of nonlinear 3D dynamic numerical models that consider the development of pore pressures and soil-structure interaction is proposed, which will allow a more accurate evaluation of the seismic performance of tunnels.

Keywords*: tunnels; seismic response; relative friction*

DOI: https://doi.org/10.26507/paper.4211

1. Introducción

Los túneles son estructuras subterráneas de vital importancia, utilizadas comúnmente para una amplia variedad de propósitos, entre los que destacan el transporte de carga, la conducción de servicios de aguas servidas y potables, así como el tránsito seguro de la comunidad. El diseño de estos ha sido desarrollado mediante soluciones analíticas cerradas o mediante análisis numéricos pseudoestáticos en dos dimensiones (2D), usualmente considerando un medio lineal-elástico.

Aunque estas simplificaciones han sido valoradas por su eficacia y por la reducción del tiempo de análisis computacional, es crucial reconocer que los geomateriales no tienen un comportamiento lineal-elástico y que se ignoran ciertos efectos tridimensionales (3D). Entre estos efectos, las direcciones ortogonales del movimiento generadas durante un evento sísmico podrían desempeñar un papel crítico en la respuesta sísmica del túnel, lo cual no es considerado en análisis 2D, además de considerar los efectos del drenaje o no drenaje en el suelo.

Por tal motivo la implementación de un análisis dinámico en tres dimensiones (3D), que considere la no linealidad del suelo, el impacto de las ondas sísmicas en las 3 direcciones y el exceso de presiones de poros para suelos granulares permitirá una evaluación más precisa y detallada, al incorporar modelos realistas que capturen el comportamiento complejo del suelo y de la estructura.

2. Metodología

La evaluación de la respuesta sísmica de túneles en condiciones tridimensionales considerando la no linealidad y condiciones no drenadas del suelo es un desafío significativo. La incorporación de modelos constitutivos básicos (lineal-elástico) y avanzados (FINN/Byrne, FINN/Martin y P2PSAND) logra simular el comportamiento del suelo y la interacción suelo-túnel bajo cargas sísmicas cuando se considera la condición no drenada del suelo y la fricción en la interfaz suelo-túnel en análisis en tres dimensiones. Además, al tener en cuenta el parámetro de flexibilidad relativa (F) sugerido por Peck et al. (1972), para considerar un túnel muy rígido y un túnel perfectamente flexible.

También se incorporará un análisis comparativo para evaluar cómo la flexibilidad relativa, la fricción en la interfaz y las condiciones de drenaje afectan la respuesta sísmica, proporcionando así una comprensión integral de los factores que influyen en la estabilidad y seguridad de los túneles en zonas sísmicas.

3. Modelos Constitutivos

Para representar las condiciones de acumulación de excesos de presión de poros en suelos saturados, se desarrolló la verificación de los modelos FINN/Byrne y FINN/Martin (Finn 1981, Byrne 1991 y Chou et al. 2021), junto con el modelo P2PSAND Cheng & Detournay (2021). Para tal fin, se simuló un ensayo de cortante simple cíclico (CSS) realizado por Nabili et al. (2008) sobre la arena de Nevada con una densidad relativa de 40%.

El ensayo se simuló de un elemento de 1 m en cada dirección del modelo. Se aplicaron condiciones para representar el efecto del cortante simple, restringiendo una de las direcciones horizontales y permitiendo el movimiento de cortante a lo largo del elemento en la otra dirección. Se aplico un esfuerzo en la dirección vertical de 80 kPa y esfuerzos horizontales de 40 kPa, lo que refiere a un coeficiente de reposo (k_o) de 0.5. Se compararon los resultados de excesos de presión de poros del ensayo con los resultados de las simulaciones usando los tres modelos. También se compararon la curva de esfuerzo-deformación con tendencias similares a las vistas con las presiones de poros como se muestra en las figuras 1 y 2.

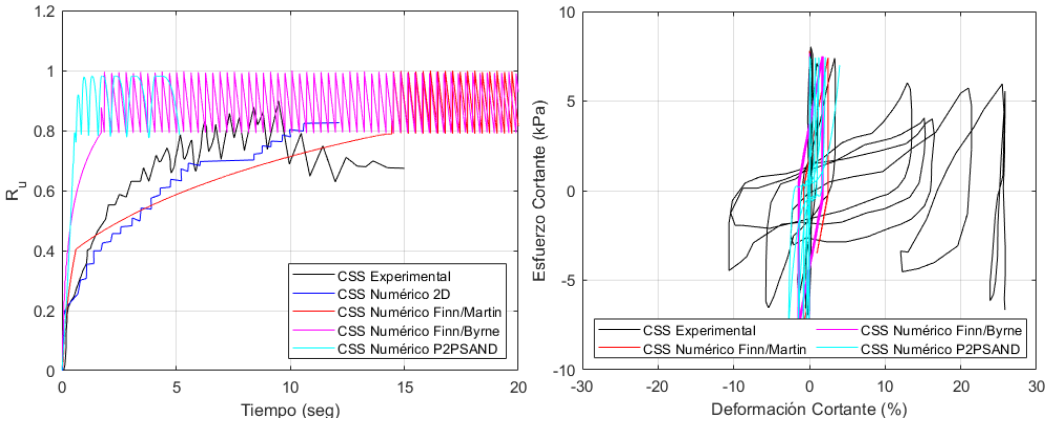

Figura 1 Evaluación de modelos constitutivos, cortante simple cíclica (CSS)

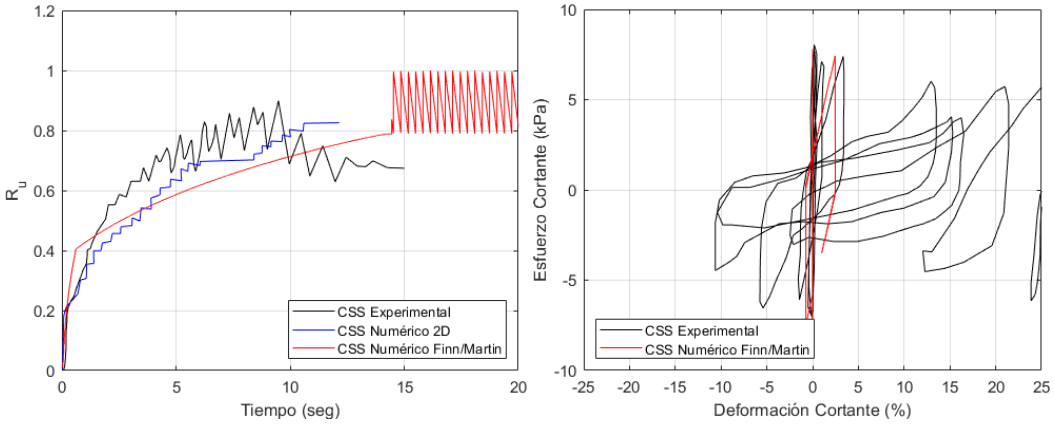

Figura 2 Excesos de presiones de poros normalizados y ciclos de histéresis ensayo CSS.

Además, se simuló un ensayo triaxial cíclico no drenado en el laboratorio de suelos de la Universidad del Valle de una arena terrígena de la ciudad de Santiago de Cali con una densidad relativa de 60%, que ha sido estudiada en las últimas 2 décadas por el grupo de investigación G7 (Arango-Serna et al. 2021, Giraldo & Sandoval 2024). El ensayo triaxial cíclico no drenado (CTX), se ejecutó en laboratorio representando las condiciones de campo, con el método de armado por subcompactación que incluye un armado de capas con control de densidad relativa Duygu (1994).

La modelación se simuló con un elemento de 1 m las direcciones horizontales de 2 m en la dirección vertical. Se establecieron condiciones para representar el efecto del triaxial cíclico no drenado, con

esfuerzos verticales y horizontales de 100 kPa simulando una consolidación isótropa. Se restringió el movimiento en la base y se aplicó un esfuerzo desviador de ±10 kPa en la cara superior del elemento, bajo una señal sinusoidal con una frecuencia de 1 Hz.Los resultados se presentan en las figuras 3 y 4, con una buenas aproximación con el modelo constitutivo Finn/Martin.

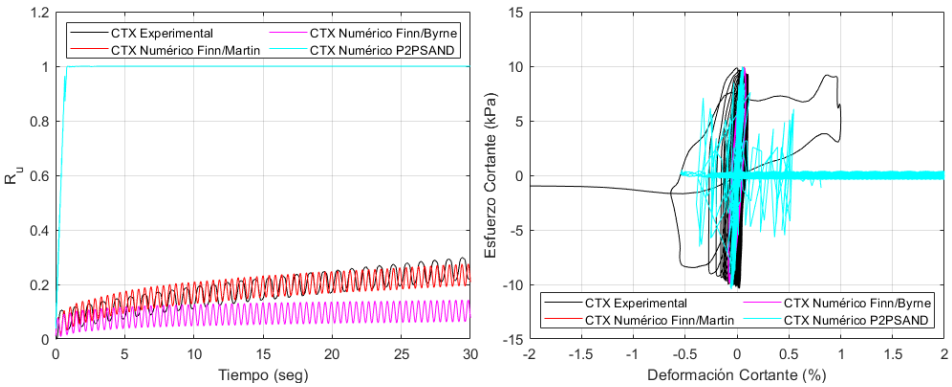

Figura 3 Evaluación de modelos constitutivos, triaxial cíclico no drenado (CTX).

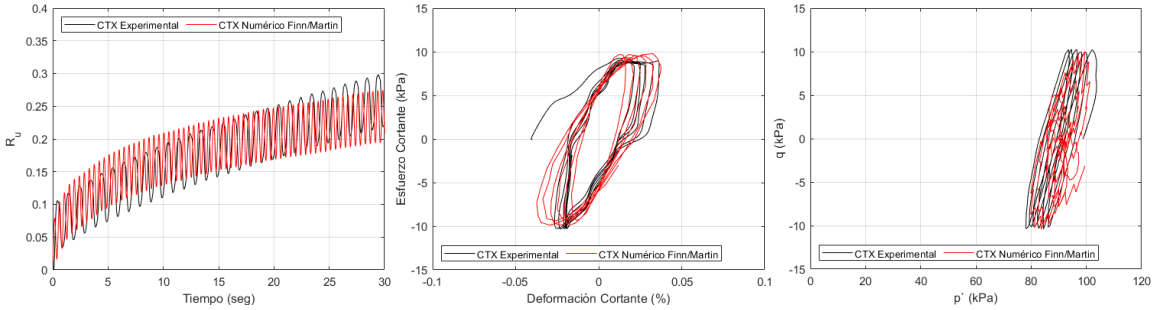

Figura 4 Excesos de presiones de poros normalizados y ciclos de histéresis ensayo CTX.

4. Modelos Geométricos y propiedades del suelo y del túnel

La implementación de modelos elásticos lineales ha permitido obtener una primera aproximación a la respuesta sísmica de túneles bajo condiciones tridimensionales. Para verificar la correcta implementación del modelo numérico, incluido el tamaño de los elementos, la aplicación de la carga sísmica, entre otras, se realizó una evaluación inicial de la respuesta del túnel bajo condiciones de cortante. Para tal fin, se compararon los resultados con las soluciones analíticas y numéricas desarrolladas por Savigamin & Bobet (2021) como se muestra en la figura 5.

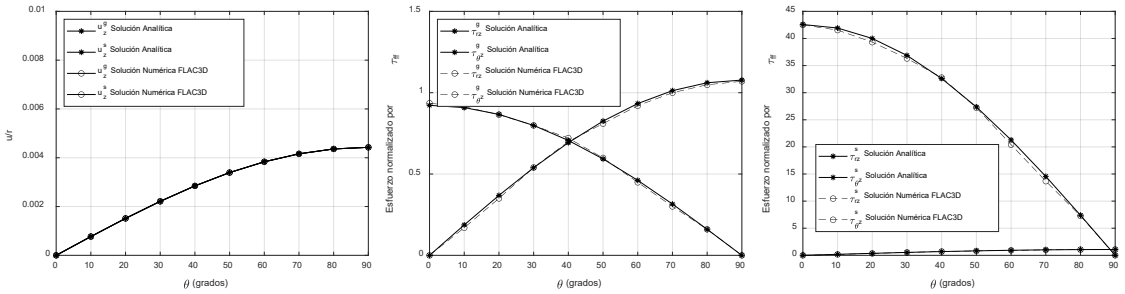

Figura 5 Desplazamientos a lo largo del eje del túnel : ángulo de circunferencia en perímetro del túnel, u_z^g: desplazamiento transversal en el suelo, u_z^s: desplazamiento transversal en la estructura, Esfuerzos en el suelo en r=4 m, : ángulo de circunferencia en perímetro del túnel, $_{rz}^g$: esfuerzo radial en el suelo, $_z^g$: esfuerzo tangencial en el suelo y Esfuerzo en el túnel en r=4 m, : ángulo de circunferencia en perímetro del túnel, $_{rz}^s$: esfuerzo radial en la estructura, $_z^s$: esfuerzo tangencial en la estructura.

5. Respuesta Sísmica en 3D

Los resultados obtenidos fueron para un valor de flexibilidad relativa de la solución analítica y numérica por Savigamin & Bobet (2021) de F=1941.3, valor usado para las tres condiciones del túnel (No Slip, Full Slip y Relative Friction).

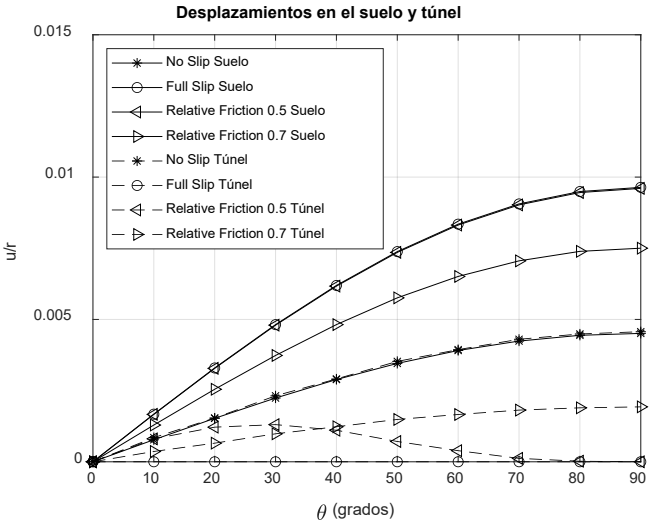

Figura 6 Desplazamientos normalizados por el radio en la interfaz suelo-túnel en dirección longitudinal bajo condición acoplada (No Slip), no acoplada (Full Slip) y fricción relativa (Relative Friction)

Respecto del comportamiento de la interfaz suelo-túnel, se ha implementado en este trabajo, usando el modelo lineal-elástico, un acoplamiento total (No Slip), deslizamiento total (Full Slip) y fricción relativa (Relative Friction) en la interfaz suelo-túnel para analizar su comportamiento bajo condiciones sísmicas. Como es de esperarse, y como se muestra en la figura 6, en la condición de acoplamiento total (No Slip), los efectos de las deformaciones del suelo y del túnel están completamente acoplados, lo que genera desplazamientos iguales en toda la sección perimetral del cuadrante 1. Por otro lado, en la condición de deslizamiento total (Full Slip), donde no se

considera el efecto de la interfaz y se permite que el suelo y el túnel se desplacen de forma independiente, el túnel presentó un desplazamiento nulo, mientras que el suelo duplicó los desplazamientos registrados en la condición anterior. Este efecto no es el más representativo, ya que la relajación de esfuerzos en el suelo durante el proceso de excavación produce una disminución del radio excavado y, en consecuencia, un contacto más limitado entre el suelo y el recubrimiento.

Por último, en la condición de fricción relativa (Relative Friction), los parámetros de rigidez de acoplamiento, fricción y elasticidad, tanto en el sentido normal como en el cortante, con base en la investigación de Huo et al. (2006), con coeficientes de fricción de un 0.4, se estimó de manera inicial un coeficiente de 0.5 y 0.7. Esta reducción permitió simular un efecto intermedio en la interacción suelo-túnel, evidenciándose una disminución de los desplazamientos en el suelo y un incremento en los desplazamientos del túnel. Esto indica que asumir una única condición de acoplamiento podría llevar a subestimar desplazamientos adicionales en el túnel, comprometiendo su comportamiento estructural.

6. Resultados

Se incorporaron tanto el modelo constitutivo como modelo numérico para los análisis dinámicos. Las propiedades del modelo fueron 50 veces el radio en la dirección X, 25 veces el radio en la dirección Y y Z, un radio de 2 metros y un espesor de 40 centímetros del túnel. Las propiedades del suelo como el módulo de elasticidad E=192 MPa, relación de Poisson =0.2, densidad =1631 kg/m^3, ángulo de fricción =33, dilatancia =0.2, cohesión para estabilizar el modelo numérico c'=1 kPa y los parámetros de la estructura del túnel con módulo de elasticidad de E=2426.5 MPa relación de Poisson =0.3 y densidad =2400 kg/m^3. A partir de estas condiciones se representa el efecto de un túnel flexible con F=15 y totalmente acoplado, lo que quiere decir que no hay desplazamiento relativo entre el túnel y el suelo en la interfaz.

Para la modelación dinámica se tuvo en cuenta: i) Fronteras absorbentes (quiet boundaries) o límites viscosos, consisten en amortiguadores independientes unidos al límite en las direcciones normal y de corte, ii) Campo libre (free-field) permite la simulación que el modelo numérico tienda al infinito, con la réplica de las condiciones de velocidad del mallado en sus límites, iii) Liberación de la restricción en la base del modelo, que permite un comportamiento flexible eliminando el efecto de las restricciones en las velocidades de las direcciones X, Y, Z., iv) Restablecimiento de desplazamientos a cero para que no sean acumulables con los generados por las cargas dinámicas como la inducida por el sismo. Lo que permite observar la respuesta sísmica tanto del suelo como la del túnel, v) Aplicación de la velocidad en la base del modelo numérico, el cual incluye una onda sinusoidal con frecuencia de 2.5 Hz, amplitud de 0.1 m/s y variación del tiempo a partir del efecto del modelo numérico.

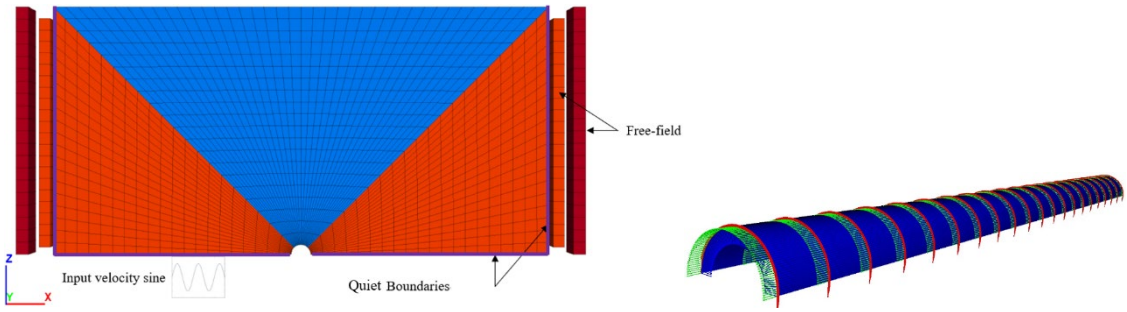

Figura 7 modelo dinámico con fronteras absorbentes, activación de campo libre, entrada sísmica en función de la velocidad y recubrimiento en 3D con nodos en dirección X, Y, Z

Hasta este momento, se ha evaluado el impacto en el suelo y el túnel de las cargas impuestas por ondas sísmicas. Estas ondas fueron aplicadas a partir de la componente de velocidad como un 100% en la dirección X, un 50% en la dirección Y, y 0% en la dirección Z.

Tabla 1 desplazamiento tridimensionales

	SUELO			**ESTRUCTURA**		
	X (m)	**Y (m)**	**Z (m)**	**X (m)**	**Y (m)**	**Z (m)**
0	0.0003	0.0001	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000
45	0.2363	0.1165	0.0190	0.2490	0.1249	0.0206
90	0.2499	0.1249	0.0007	0.2490	0.1249	0.0206
135	0.2372	0.1183	0.0228	0.2504	0.1250	0.0153
180	0.0013	0.0009	0.0012	0.0000	0.0000	0.0000

Los desplazamientos observados muestran el efecto de la aplicación de una componente sinusoidal en función de la velocidad. Es notable que, en la dirección X, donde se aplicó el 100%, los desplazamientos son significativamente mayores. En la dirección Y, se observa una reducción de aproximadamente el 50% en comparación con X, producto de la reducción de la velocidad a la mitad, mientras que en la dirección Z, el efecto resulta ser poco significativo.

Estos resultados reflejan la influencia de las componentes sísmicas en la respuesta de los túneles ante cargas dinámicas, sugiriendo la necesidad de considerar estas componentes al analizar los efectos de los túneles ante la respuesta sísmica.

7. Bibliografía

- Arango-Serna, S., Herrera, M., Cruz, A., Sandoval, E., Thomson, P., & Ledezma, C. (2021). Use of ambient noise records in seismic engineering: An approach to identify potentially liquefiable sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *148*(July 2020). https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106837
- Byrne, M. P. (1991). A cyclic shear-volume coupling and pore pressure model for sand. *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics*, *47–55*.

- Cheng, Z., & Detournay, C. (2021). Formulation, validation and application of a practice-oriented two-surface plasticity sand model. *Computers and Geotechnics*, *132*, 103984. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103984
- Chou, J. C., Yang, H. T., & Lin, D. G. (2021). Calibration of finn model and ubcsand model for simplified liquefaction analysis procedures. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(11). https://doi.org/10.3390/app11115283
- Duygu, E. (1994). Effect of fines content on liquefaction potential of sands. In *ProQuest Dissertations and Theses* (p. 203). https://librarylink.uncc.edu/login?url=http://search.proquest.com/docview/304124683?accountid=14605%0Ahttp://hl5ka4cm7m.search.serialssolutions.com/?ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&rfr_id=info:sid/ProQuest+Dissertations+%26+Theses+Global&rf
- Finn, W. (1981). Liquefaction potential: developments since 1976. *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 655–681. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-SJDC198202003.htm
- Giraldo, F., & Sandoval, E. (2024). *Velocidad de onda cortante y comportamiento esfuerzo deformación en 2 suelos arenosos de Colombia*. Universidad del Valle.
- Huo, H., Bobet, A., Fernández, G., & Ramírez, J. (2006). Analytical solution for deep rectangular structures subjected to far-field shear stresses. In *Tunnelling and Underground Space Technology* (Vol. 21, Issue 6, pp. 613–625). https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.135
- Nabili, S., Jafarian, Y., & Baziar, M. H. (2008). Evaluation of the Martin Et Al . (1975) Pore Pressure Build Up Model Using Laboratory Test Data. *Development*, 0–8.
- Peck, R., Hendron, A. J., & Mohraz, B. (1972). State of the art of soft-ground tunneling. *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, *Vol 1*, pp 259-286 Chicago, IL, United States.
- Savigamin, C., & Bobet, A. (2021). Seismic response of a deep circular tunnel subjected to axial shear and axial bending. In *Tunnelling and Underground Space Technology* (Vol. 112). https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103863

Sobre los autores

- **Francisco Javier Giraldo Bustamante**: Ingeniero Civil - Universidad de Ibagué, Especialista en Geotecnia, Magister en Ingeniería – Énfasis en Ingeniería Civil – Orientación en Geotecnia, Doctorando en Ingeniería – Énfasis en Mecánica de Sólidos Universidad del Valle. Estudiante doctoral giraldo.francisco@correounivalle.edu.co
- **Eimar Andrés Sandoval Vallejo**: Ingeniero Civil - Universidad del Cauca, Magíster en Ingeniería Civil - Universidad de Puerto Rico Mayagüez, Doctor en Filosofía de Universidad de Purdue, West Lafayette. Profesor titular. eimar.sandoval@correounivalle.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)