

Análisis dinámico de muro de contención reforzado con geosintéticos

Celso Romanel, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Rio de Janeiro, Brasil
Esteban Maldonado, Cigeomin Consulting

ABSTRACT

This work presents the dynamic analysis of retaining wall of 10.40 meters of high slope, reinforced with 9 layers of geogrids of 10 meters long, the structure is located in a moderate seismic activity zone of Perú. The aspects studied are related to the modeling and the dynamic response of the mechanically stabilized reinforced soil wall considering different types of mechanical damping. The seismic analysis was performed using analysis program FLAC of finite differences that allows estimation of large deformations.

The soil mechanical behavior was simulated through the Mohr-Coulomb elastoplastic constitutive model and was evaluated the Rayleigh, hysteretic damping and a combination of both, in order to understand its influence on the dynamic response of reinforced-soil retaining walls under base excitation.

RESUMEN

Este trabajo presenta el análisis dinámico de un muro de contención de 10.40 metros de altura, reforzado con nueve capas de geomallas de 10 metros de longitud, la estructura se encuentra localizada en una zona de moderada actividad sísmica del Perú. Los aspectos estudiados son relacionados al modelamiento y a la respuesta dinámica del muro de suelo reforzado que considera diferentes tipos de amortiguamiento mecánico. El análisis sísmico se realizó empleando el programa de análisis FLAC de diferencias finitas que permite la estimación de grandes deformaciones.

El comportamiento mecánico del suelo fue simulado a través del modelo constitutivo elasto-plástico Mohr-Coulomb y se ha evaluado el amortiguamiento Rayleigh, histerético y la combinación de éstas, con el propósito de entender su influencia en la respuesta dinámica de muros de suelo reforzado bajo excitación en la base.

1. INTRODUCCIÓN

Centenas de millones de personas en todo el mundo viven sobre condiciones de riesgo sísmico susceptibles a pérdidas de vidas humanas y grandes pérdidas económicas que conllevan a paralización de servicios y de infraestructuras públicas o privadas. Entre los muros reforzados que han sufrido daños durante los sismos podemos citar al muro reforzado de Valencia que presentó agrietamientos detrás de la cresta en el terremoto de Northridge (Bathurst & Cai, 1995) y la rotura de paramento de bloques de concreto del muro reforzado con geosintéticos después del terremoto Chi Chi (Tai-Chung, Taiwan, 1999) como se ilustra en la Figura 1.

A pesar de la gran evolución recientemente verificada en el análisis sísmico de suelos reforzados, varios aspectos todavía requieren estudios más profundos para esclarecer el comportamiento de muros reforzados y así posibilitar un adecuado proyecto de ingeniería, tanto en términos técnicos y económicos, en diversas regiones sobre diferentes grados de peligro sísmico.

Este trabajo tiene como finalidad analizar la respuesta sísmica de un muro de relave mecánicamente estabilizado, con 76° de inclinación del talud y reforzado con 9 capas horizontales de geomallas de 10 m de longitud.

El análisis dinámico ha sido realizado usando el programa bidimensional de diferencias finitas FLAC (Fast Lagrangian Analysis of continua, ITASCA, 2005) y el refuerzo con geosintéticos fue representado por el elemento "cable". El comportamiento mecánico del material de relave ha sido simulado a través del modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb, considerando amortiguamiento Rayleigh (dependiente de la frecuencia), amortiguamiento histerético (dependiente de la deformación por corte del suelo) y una combinación de ambos.



Figura 1. Daños del muro reforzado con geosintéticos después del terremoto Chi Chi, Taiwan, 1999 (Koseki and Hayano et al. 2000).

2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Las propiedades del material de suelo del muro usados para el análisis se considera masa específica de 1887 Kg/m^3 , ángulo de fricción interna de 30° , relación de Poisson's $\nu = 0.30$, el módulo de corte (G) ha sido estimado con variación de tensión efectiva media en diversas zonas del muro usando la expresión de Seed & Idriss et al. (1970) y el lenguaje de programación FISH (FLAC), de igual forma el valor del módulo de deformación volumétrica (K) ha sido obtenida a través de relaciones de la teoría de elasticidad.

La fundación de la estructura tiene una masa específica de 1938 Kg/m^3 y fue asumido como material elástico con módulo de corte (G) de 824.50 MPa y con módulo de deformación volumétrica (K) de 1786.42 MPa .

Las tres capas inferiores de refuerzo del muro son constituidos por geomallas uniaxiales de resistencia a tracción de 200 kN/m ($E = 343800 \text{ kN/m}^2$) y los seis capas superiores están constituidos por geomallas de 150 kN/m ($E = 271800 \text{ kN/m}^2$), con espaciamientos verticales entre capas de geomallas de 1.20 m . El paramento formado por geosintéticos auto envueltos tiene las mismas propiedades que el muro, con adición de cohesión de material de 30 kPa . La interfase suelo-refuerzo fue asumido como un material argamasa de espesor despreciable con ángulo de fricción interna de 31.2° y módulo de corte (Kbond) de 10^{09} N/m/m .

3. MODELAMIENTO DINÁMICO USANDO FLAC

3.1 Modelo numérico

El modelo numérico de todo el muro reforzado se muestra en la Figura 2. Se considera el ancho del paramento de 1.33 m hacia la cara frontal del muro.

Los métodos numéricos que dependen de la discretización de una región finita del espacio requieren una representación apropiada de los contornos de las mallas. En el modelo dinámico, amortiguadores viscosos (quiet boundaries) han sido colocados en el contorno de la malla para absorber ondas incidentes y evitar su reflexión, dicho contorno desarrollado por Lysmer y Kuhlemeyer et al, (1969) para problemas dinámicos trae incorporado el programa FLAC. Asimismo, para que los contornos laterales del modelo conserven sus características de absorción de ondas se ha utilizado el contorno de campo libre (Free Field Boundary) implementado en FLAC.

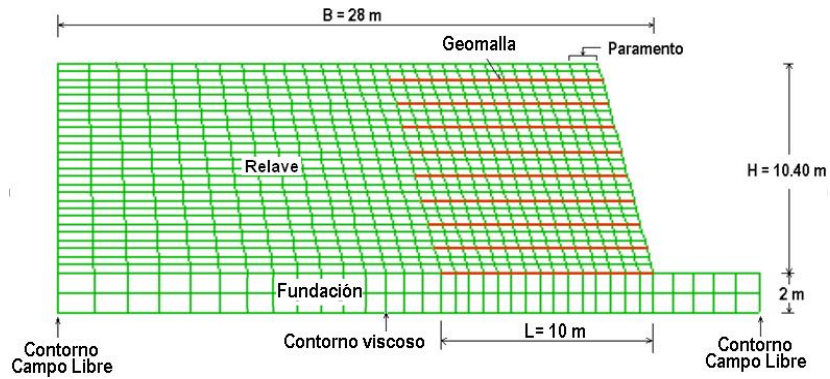


Figura 2. Malla numérica del modelo en el FLAC.

3.2 Carga sísmica

Para el análisis dinámico se estimó el movimiento sísmico registrado el 23 de Junio del 2001 en la Estación de Moquegua por CISMID-Perú, éste señal ha sido escalada al valor de la aceleración máxima del terreno. Luego, ha sido evaluada su amplificación sísmica usando el programa SHAKE para su aplicación en el contorno de la fundación del muro, considerándose para el presente problema la fase intensa del registro sísmico, como se ilustra en la Figura 3.

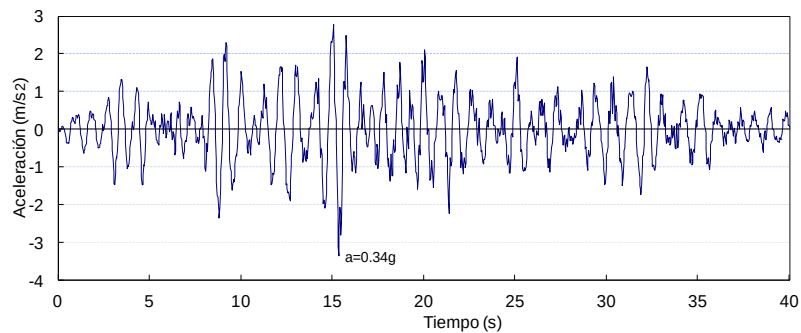


Figura 3. Tiempo historia de aceleración horizontal del sismo

El registro antes de ser aplicado como carga sísmica del problema, ha sido filtrado para remover componentes de alta frecuencia y los datos por línea de base han sido corregidos. La función FISH INT.FIS (FLAC) integra el registro de aceleraciones filtradas para producir las correspondientes historias de velocidades y desplazamientos. Luego, el desplazamiento residual después del término de este proceso de integración alcanzó a -0.7085 m. La corrección de la línea de base ha sido ejecutada adicionando una onda senoidal de baja frecuencia al registro de las velocidades. Los parámetros que describen esta onda han sido ajustados de forma que el desplazamiento final se vuelva cero. La historia de velocidades y desplazamientos, con o sin corrección de la línea de base son ilustrados en las Figuras 4 y 5.

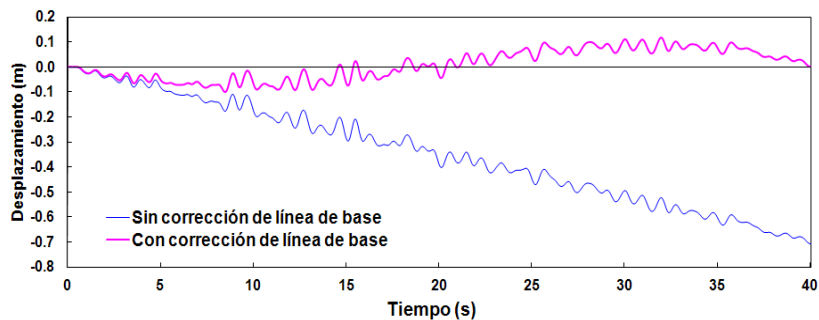


Figura 4. Desplazamientos con corrección de Línea de base

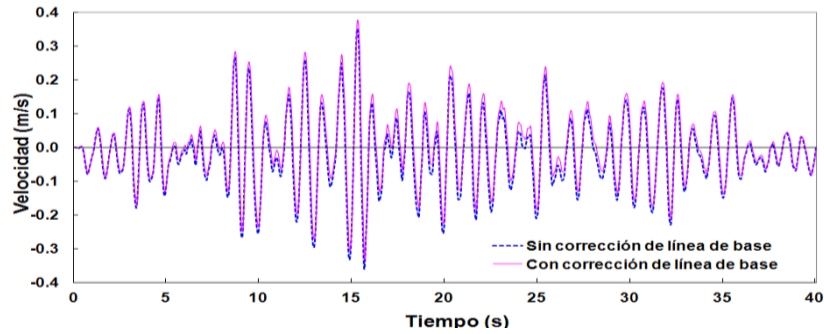


Figura 4. Velocidades con corrección de Línea de base

Posteriormente, el registro previamente tratado se ha convertido en registro de ondas de tensión cortante aplicando la siguiente expresión (FLAC):

$$\sigma_s = a(\rho C_s)v_s \quad [1]$$

Donde: σ_s = tensión cortante aplicada, ρ = masa específica, C_s = velocidad de propagación de onda S, v_s = velocidad de la partícula.

Para obtener el valor de la constante “a” ha sido necesario realizar pequeños ajustes en su valor, de tal manera que en la base del modelo (contorno silencioso) produzca velocidades similares al de la historia de velocidades del sismo corregido, obteniéndose para nuestro caso un valor de $a = 1.15$, así como se ilustra en la Figura 5.

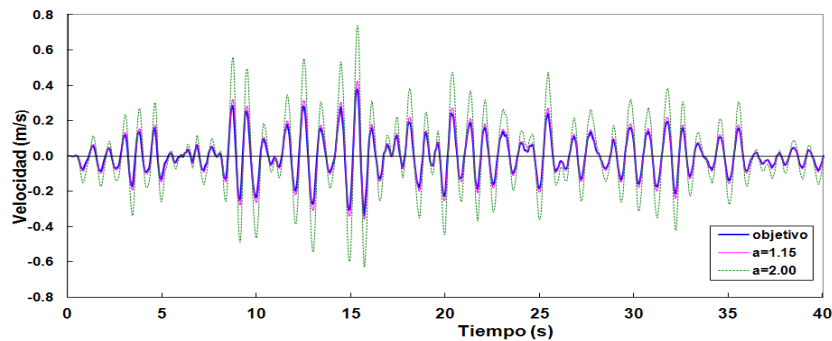


Figura 5. En la base del modelo, en función de las velocidades horizontales

3.3 Frecuencia fundamental del sistema

Antes de aplicar diversos tipos de amortiguamiento del material, un análisis de la respuesta dinámica del sistema no-amortiguado ha sido ejecutado para la determinación de su frecuencia fundamental. Las velocidades han sido monitoreadas en diferentes puntos del modelo, tanto en suelos como en elementos de refuerzo del muro, con este registro de velocidad fue ejecutada la Transformada Rápida de Fourier (FFT) con el objetivo de determinar la frecuencia dominante, obteniéndose para este problema 1.048 Hz. El conocimiento de este valor de la frecuencia fue necesario para la definición de los análisis dinámicos con amortiguamiento de Rayleigh.

Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados de velocidades horizontales y el espectro de potencia para el punto nodal (15,15) situado detrás de la región del refuerzo del muro para un sistema no amortiguado.

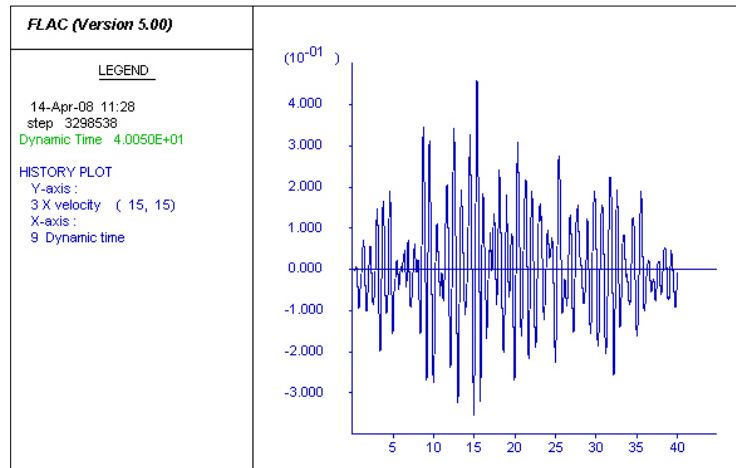


Figura 6. Historia de las velocidades horizontales X(m/s) no-amortiguadas en el punto nodal (15,15) usando FLAC.

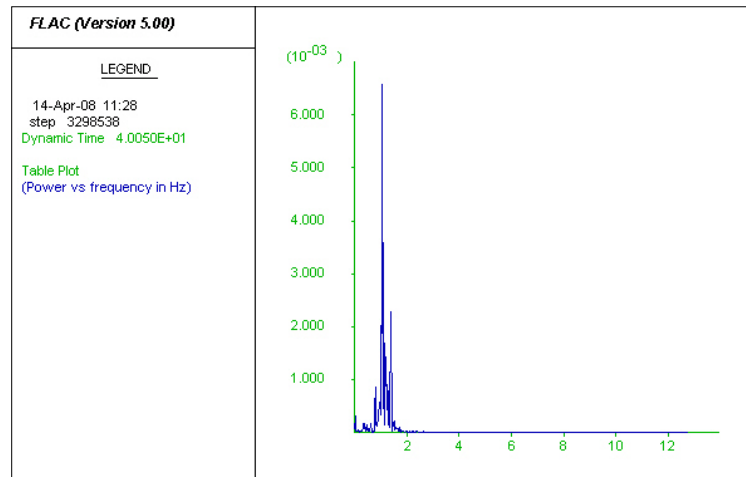


Figura 7. Espectro de potencia de las velocidades horizontales no-amortiguadas en el punto nodal (15,15) del modelo. Frecuencia fundamental = 1.048 Hz.

4. RESULTADOS DE ANÁLISIS DINÁMICO

4.1 Influencia de amortiguamiento de Rayleigh

El amortiguamiento de Rayleigh se usó originalmente en el análisis dinámico de estructuras y cuerpos elásticos para amortiguar los modos de oscilación natural del sistema y su expresión está asociada a la forma matricial, siendo la matriz de amortiguamiento $[C]$ utilizada como componente proporcional de la matriz de masa $[M]$ y de rigidez $[K]$, como se plantea en la siguiente expresión:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad [2]$$

Donde:

α = Constante de amortiguamiento proporcional a la masa.

β = Constante de amortiguamiento proporcional a la rigidez.

Para la simulación dinámica con amortiguamiento de Rayleigh, se ha estimado una frecuencia dominante de 1.048Hz y un razón de amortiguamiento crítico de 7.5%(Arena Limosa, Stevens 1965), los cuales forman parte de datos de entrada para el análisis del muro reforzado, durante los 40 segundos del sismo.

4.2 Influencia de amortiguamiento histerético

La disipación de energía en suelos es en gran parte de naturaleza histerética. La simulación anterior del comportamiento del muro reforzado es nuevamente repetida atribuyéndose parámetros de amortiguamiento histerético. La curva de degradación del módulo de corte considerada para arenas fue aquella propuesta por Seed & Idriss et al. (1970), a partir de ésta, la curva de razón de amortiguamiento crítico ha sido implementado en FLAC.

El amortiguamiento histerético disponible en el FLAC v.5 no ofrece suficiente amortiguamiento para niveles de deformación muy bajos o para altas componentes de frecuencia, siendo necesario en este caso, combinar el amortiguamiento histerético con el amortiguamiento Rayleigh. Esta combinación de amortiguamientos permite que los pasos críticos para la estabilidad numérica sean reducidos automáticamente, y disminuye el tiempo de ejecución del problema en el computador. Por consiguiente, una pequeña cantidad de amortiguamiento Rayleigh proporcional a la rigidez es aplicado, en 0.5% de frecuencia fundamental $f = 1.048$ Hz.

La Figura 8 muestra los contornos de desplazamientos del muro considerando amortiguamiento histerético más 0.5% de amortiguamiento Rayleigh al final de la excitación sísmica. La Figura 9 muestra la superficie potencial de ruptura de tipo aproximada bilineal con ángulos de elevación de 15° a 30° y se observa mayor concentración de deformaciones por cizallamientos en la región de anclaje de refuerzos sobre la superficie de ruptura y la Figura 10 muestra la distribución de las fuerzas máximas de tracción a lo largo de los refuerzos.

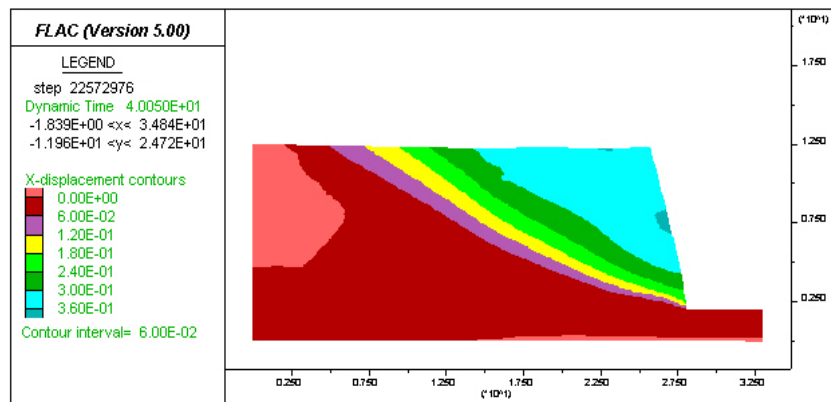


Figura 8. Contornos de desplazamientos horizontales al final de la excitación sísmica. Amortiguamiento histerético y de Rayleigh (0.5%).

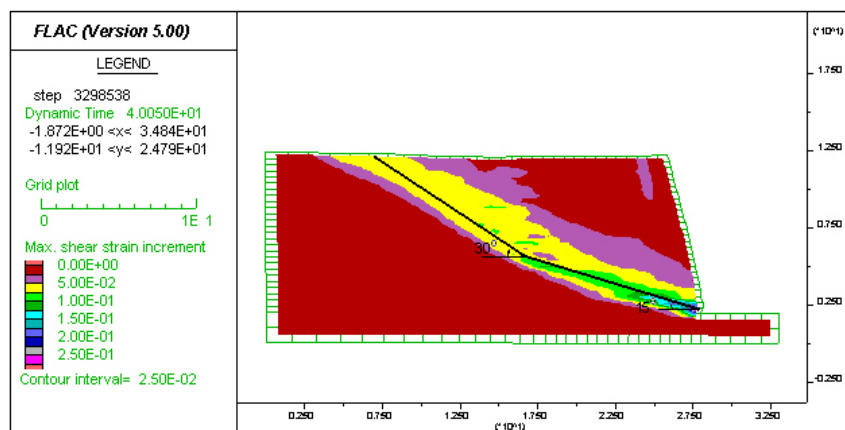


Figura 9. Contornos de incrementos máximos de deformaciones por cortes al final de la excitación sísmica. Amortiguamiento histerético y de Rayleigh (0.5%).

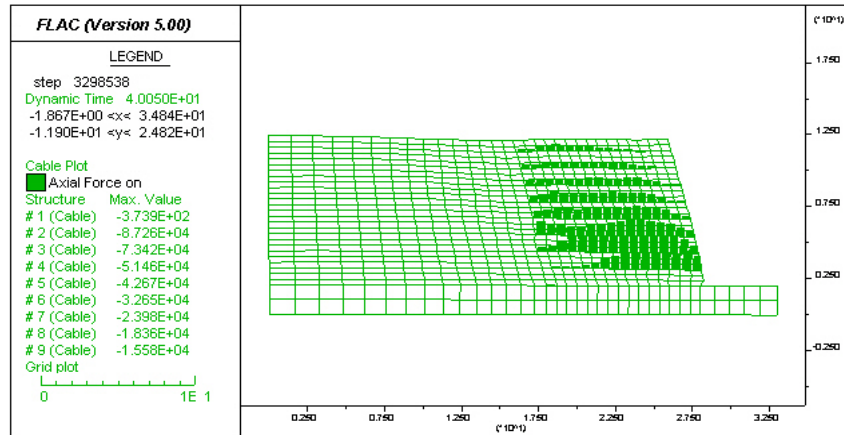


Figura 10. Fuerzas máximas de tracción en las capas de refuerzo al final de la excitación sísmica. Amortiguamiento histerético y de Rayleigh (0.5%).

4.3 Comparación de los resultados

La Figura 11 presenta los resultados de análisis dinámico del muro reforzado para diferentes tipos de amortiguamiento mecánico. Según los resultados, si consideramos solo amortiguamiento Rayleigh se obtiene menores desplazamientos horizontales en la fase del muro, que alcanzó valores próximos a 0.19 m en la parte superior del talud y presentó pequeño embarrigamiento a media altura del talud. Además, se observó que la variación de las curvas de los desplazamientos horizontales en la parte superior del talud para amortiguamiento histerético y para la combinación de amortiguamiento histerético + 0.5% Rayleigh, ha sido de 0.26 m a 0.31m, respectivamente.

Otro aspecto importante, es la adición de 0.5% de amortiguamiento Rayleigh al amortiguamiento histerético, el cual ha originado mayores desplazamientos y mejor distribución de los desplazamientos en la fase del talud.

La Figura 12 presenta las curvas de fuerzas axiales máximas desarrolladas en los refuerzos. Se observa que la curva correspondiente al amortiguamiento Rayleigh ha presentado valores significativamente menores que las curvas con amortiguamiento histerético, alcanzando la fuerza de tracción máxima hasta 68 kN/m en la segunda capa de refuerzo. Sin embargo, para amortiguamiento histerético + 0.5% Rayleigh la curva de fuerzas máximas de tracción en los refuerzos ha presentado valores aún mayores, que alcanza 87.5 kN/m en la segunda capa de refuerzo.

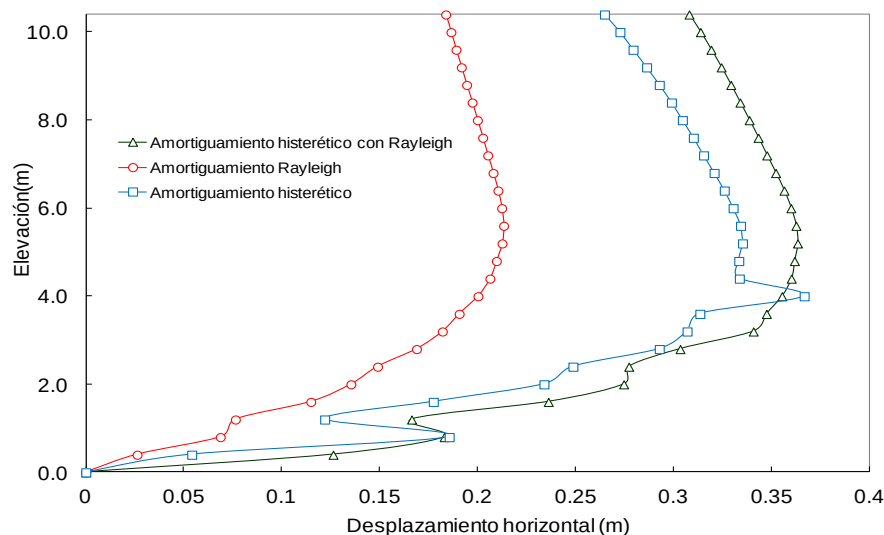


Figura 11. Influencia del amortiguamiento mecánico en el desplazamiento horizontal de la fase del muro.

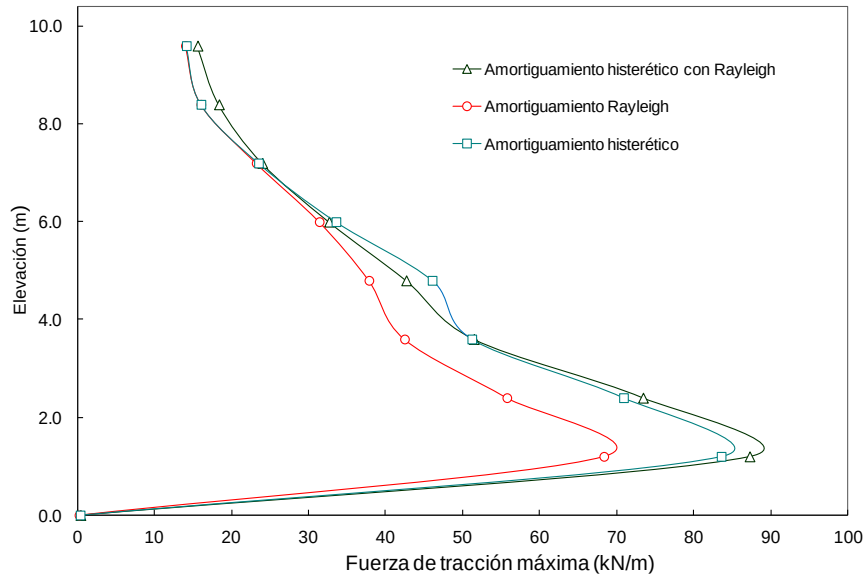


Figura 12. Influencia del amortiguamiento mecánico en la fuerza de tracción máxima del muro.

5. CONCLUSIONES

Los resultados del análisis dinámico del muro reforzado usando FLAC mostraron menores desplazamientos horizontales de la cara del muro para amortiguamiento Rayleigh, que alcanzó a 0.19 m en la parte superior del talud, sin embargo, considerando amortiguamiento histerético+0.5% Rayleigh alcanzó 0.31 m de desplazamiento relativo.

Las fuerzas axiales en las geomallas producidos por amortiguamiento Rayleigh alcanzaron hasta 68 kN/m en la segunda capa. Sin embargo, para amortiguamiento histerético + 0.5% Rayleigh presentaron valores aún mayores, llegando hasta 87.5 kN/m en la segunda capa de refuerzo. Asimismo, los valores de las fuerzas axiales de geomallas para amortiguamiento histerético con Rayleigh han sido aproximadamente similares con valores obtenidos por amortiguamiento histerético.

Sobre la base de los resultados obtenidos, se demuestra que los efectos del amortiguamiento mecánico en el comportamiento dinámico del muro reforzado con geosintéticos influyen significativamente en los resultados. En la simulación a través del programa FLAC, la mejor opción para este caso parece ser la consideración de amortiguamiento histerético combinada con 0.5% de amortiguamiento Rayleigh, porque tiene mejor control de las deformaciones del muro, disminuye el tiempo de ejecución del problema en el computador y es la más real. El análisis efectuado con amortiguamiento Rayleigh dependiente de la frecuencia envuelve tiempos de procesamiento bastante prolongado.

Finalmente, las concentraciones de las deformaciones máximas por corte en la región del muro reforzado desarrolladas por acción sísmica ilustran probable superficie de falla de tipo bilineal.

REFERENCIAS

- Bathurst, J. R. & Hatami, K. (1999). Earthquake response analysis of reinforced-soil walls using FLAC. Proceedings of the international FLAC symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota, USA, pp 407-415
- Cundall, A.P. (2006). A Simple hysteretic damping formulation for dynamic continuum simulations. 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics – 2006 - Hart & Varona, paper: 05 -07.
- Hatami, K. & Bathurst, R.J. (2000). Effect of structural design on fundamental frequency of reinforced - soil retaining walls. Soil Dynamics and Earth Engineering, Civil Engineering Department, Royal Military College of Canada, Kingston, Canada, pp 137 - 157.
- ITASCA Consulting Group (2005). Fast Lagrangian Analysis of continua, Version 5.0. Itasca consulting group, Inc. MN, Minneapolis.

- James M.; Aubertin M.; Wilson G.W. (2006). Evaluation of the dynamic stability of a tailings dam using FLAC. 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Hart & Varona (eds.), paper: 04-04.
- Koseki and Hayano (2000). Preliminary report in damage to retaining wall caused by the 1999 Chi-Chi earthquake, Bulletin of ER8, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, 33, 23-34.
- Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice - Hall, New Jersey, pp 653.
- Seed, H. B. & Idriss, I.M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report No. EERC 70 - 10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. Of California, Berkeley, California.
- Lysmer, J., and R.L. Kuhlemeyer (1969). Finite Dynamic Model for Infinite Media., J.Eng.Mech.,95(EM4), 859-877.
- Tatsuoka, F.; Koseki, J. & Tateyama, M. (1997). Performance of reinforced soil structures during the 1995 Hyogo - ken Nambu earthquake. Proceedings of the international symposium on earth reinforcement Fukuoka, Kyushu, Japan, Vol. 1, pp 973 - 1008.
- Viera, S.C.; Lopes, M.L. & Caldeira, L.M.M.S. (2006). Seismic Response of a geosynthetic reinforced steep slope using FLAC. Proceedings of the fourth international FLAC symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Itasca Consulting Group Inc., Mineanópolis, USA, paper: 05 - 06.