

Análisis tenso-deformacional no lineal dinámico de estructuras de tierra

Nonlinear stress-strain dynamic analysis in earthen structures

Michael Álvarez González¹, Milena Mesa Lavista², Lamberto Álvarez González³,
Aleski A. Aguiar Hernández⁴

¹Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara, Cuba

²Universidad Politécnica José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

^{3,4}Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba

Correo electrónico: michael@vc.hidro.cu

Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional 

Recibido: 18 de septiembre de 2017 Aprobado: 19 de enero de 2018

Resumen

El peligro de la ocurrencia de un sismo, es un riesgo a considerar en las obras a diseñar y en la evaluación de las existentes. Estos siniestros pueden ser modelados en un ambiente virtual, haciendo posible determinar la respuesta de la estructura en eventos extremos de diferentes magnitudes e intensidad en un tiempo específico. La utilización del Método de los Elementos Finitos como una herramienta de simulación en múltiples escenarios, permite evaluar la respuesta estructural de casos de estudio, durante la ocurrencia de un sismo y su respuesta al comportamiento de las partes estructurales que integran la obra en tiempo real de los modelos teóricos virtuales. El presente trabajo, expone un compendio de resultados alcanzados por un grupo multidisciplinario de especialistas en el ejercicio de investigaciones y soluciones técnicas a problemas de ingeniería relacionadas a las deformaciones y la estabilidad de taludes en obras de tierra, ante la acción de un sismo sintético. Se propone un material genérico que permite identificar herramientas de análisis de avanzada, sugiriendo una guía secuencial empírica, a partir de los resultados alcanzados en los casos de estudio que son comentados en el cuerpo del documento.

Palabras claves: sismos sintéticos, método de los elementos finitos, factor de seguridad, deformaciones, presas de tierra, terraplenes de carreteras

Abstract

The hazard of an earthquake occurrence is a risk to consider in design and evaluation works, modeling a virtual environment in which it becomes possible to determine the different degrees of response associated with the structural response in extreme events of different magnitudes and intensity in the same time duration. The use of the Finite Element Method as a simulation tool in multiple scenarios, evaluates the structural response of case studies, during the occurrence of an earthquake and its response to the behavior of the structural parts that make up the work in real time on virtual and theoretical models. This work presents a summary of results achieved by a multidisciplinary group of specialists in performance of research and technical solutions to engineering problems related to

deformation and slope stability in earthworks, before the action of a synthetic earthquake; where a generic material that identifies advanced analysis tools, suggesting an empirical sequential guide, based on the results achieved in the case studies are discussed in the document body is proposed

Key words: synthetic earthquake, finite element method, slope stabilities, earth dam, slope stabilities, roads embankments

INTRODUCCIÓN

El comportamiento del factor de seguridad (FS) del talud es uno de los primeros elementos a considerar en el análisis de estructuras de tierra. Los estudios presentados por Díaz, M. y Rivas, M. [1] hacen referencia a ello, y proponen un procedimiento para el predimensionamiento y cálculo de estabilidad en represas de tierra a partir de una serie de criterios en función de la altura, ancho de la cresta y los taludes tanto aguas arriba como aguas abajo, determinado en un segundo momento su estabilidad utilizando los métodos de equilibrio límite. La utilización del Método de los Elementos Finitos (MEF) como una herramienta auxiliar en el análisis permite obtener también, el FS mínimo. Esto posibilita evaluar las variaciones que posee la cortina del embalse dada las diversas acciones antrópicas y no antrópicas que ocasionan la aparición de diversas patologías.

En particular, las obras de tierra como son las presas de tierra y los terraplenes para carretera, son estructuras que deben ser funcionales al paso de los desastres naturales (sismos). A lo largo de los años se han desarrollado métodos para la evaluación de los sismos como son: el método de Newmark en 1965, Markdisi y Seed en 1978; Jansen en 1990 y Sarma en 1979, que estiman la deformación de la superficie de falla bajo la acción sísmica [2].

El método general del análisis de Newmark, se propuso en 1965 para calcular el desplazamiento de presas de tierras y taludes en el momento de un sismo. Este es un análisis que modela el deslizamiento de un talud como un bloque rígido-plástico que se desliza sobre un plano inclinado, el cual es sujeto a una onda sinusoidal. Para obtener las aceleraciones críticas de uso en el análisis del bloque deslizante, se realiza por el Método de los Estados Límites (MEL). El coeficiente a utilizar es el calculado para un FS igual a 1,0 en un análisis pseudoestático. Cuando la aceleración de la onda sísmica excede el valor de k_y , el bloque se mueve y el resto del tiempo el bloque no se mueve. En esta forma se calcula la deformación acumulada durante el paso del sismo en la superficie de respuesta.

Los procedimientos previamente comentados, durante el proceso de redimensionamiento de los parámetros de la cresta y cálculo de los FS para los taludes, no incluyen en el proceso de cálculo método alguno en el que sea valorado la acción dinámica de otras fuerzas como son los sismos, a diferencia de Lyapichev [3] que al validar el proyecto de recrecimiento del diseño de la Presa Limón de altura de 45 m (construida) a 82 m (sobreelevación futura) para escenarios estáticos y dinámicos evalúa la estabilidad de los taludes a partir del cálculo de las intensidades de las aceleraciones sísmicas en puntos determinados en la corona de la presa con sus ordenadas respectivas. Adecuando los posibles valores estimados acorde con datos experimentales propuestos por la norma SNIP 2.06.05-1984 actualizada en 1998, sin la utilización de un espectro sísmico que pueda aportar valores críticos de las aceleraciones que son simplificados en los métodos tradicionales según los parámetros estándares que se identifican para la zona en la que desarrolla la investigación.

A partir de la contradicción anterior, Bertero [4] desarrolló una solución matemático-estadística contenida en un proceso de selección y creación de sismos sintéticos utilizando el método de Newmark-Hall donde se hace posible construir un espectro de diseño elástico a partir del tipo de suelo y las máximas aceleraciones, velocidades y desplazamientos del suelo y su relación entre la pseudoaceleración, la pseudovelocidad y el desplazamiento espectral, así como las relaciones entre la pseudovelocidad y la pseudoaceleración de 3 500 estaciones con registros sísmicos en dos direcciones ortogonales, clasificándolos por tipos de suelos según la intensidad del movimiento sísmico registrados.

Con el proceso de desarrollo de nuevas plataformas computacionales que implementan el MEF para la modelación de escenarios cada vez más complejos, varios autores han realizado significativos aportes en el campo de la modelación dinámica bidimensional no lineal de presas de tierra, terraplenes para carreteras y en la estabilidad de taludes [3, 5-11] en la que todos convergen como criterio común en la necesidad de simplificar cada vez menos los problemas dinámicos que son analizados en función del coste computacional y la naturaleza estocástica del sismo ante una probable ocurrencia en el proceso de generar un sismo sintético.

En el presente artículo se realiza un estudio de casos, aplicado a una presa de tierra y un terraplén de carretera, donde se integra el análisis dinámico y tenso-deformacional con el factor de estabilidad del talud frente a la sollicitación sísmica mediante la generación de sismos sintéticos calibrados a las características físico-geográficas de la zona donde se encuentran las obras. Se asumen por objetivo principal: modelar la ocurrencia de un sismo sintético en estructuras de tierra, para evaluar su comportamiento tenso-deformacional y el factor de seguridad del talud en un modelo virtual utilizando como herramienta el Método de los Elementos Finitos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Al realizar un modelo matemático bidimensional de cálculo utilizando el MEF como una herramienta de modelación basado en la geometría espacial de la estructura real en un modelo virtual bajo la acción de múltiples cargas, la combinación e interacción de estas y una discretización detallada del dominio por medio de diferentes tipos de Tecnologías de Elementos Finitos (TEF), hace más económico evaluar y modificar un prototipo o maqueta virtual de laboratorio basado en sus parámetros físico-mecánicos reales o estimados ante la acción y respuesta de la estructura en diversos escenarios. Sin embargo, el MEF, no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método.

En el proceso de modelación físico-numérica se decide adoptar el esquema general de trabajo para el análisis y la simulación del sismo propuesto en la figura 1 [12], con la nominalización de los modelos que van a describir los fenómenos objeto de estudio para la presente investigación. Por lo que se hace necesario partir de un esquema de análisis de modelación común y de datos iniciales donde se valoren los resultados alcanzado por los modelos teóricos empleados para determinar el comportamiento de las deformaciones y de la estabilidad del talud correspondientes al enfoque principal propuesto de no minimizar la complejidad de los procesos físico-mecánicos registrados en el cuerpo de la cortina durante la ocurrencia de un sismo.

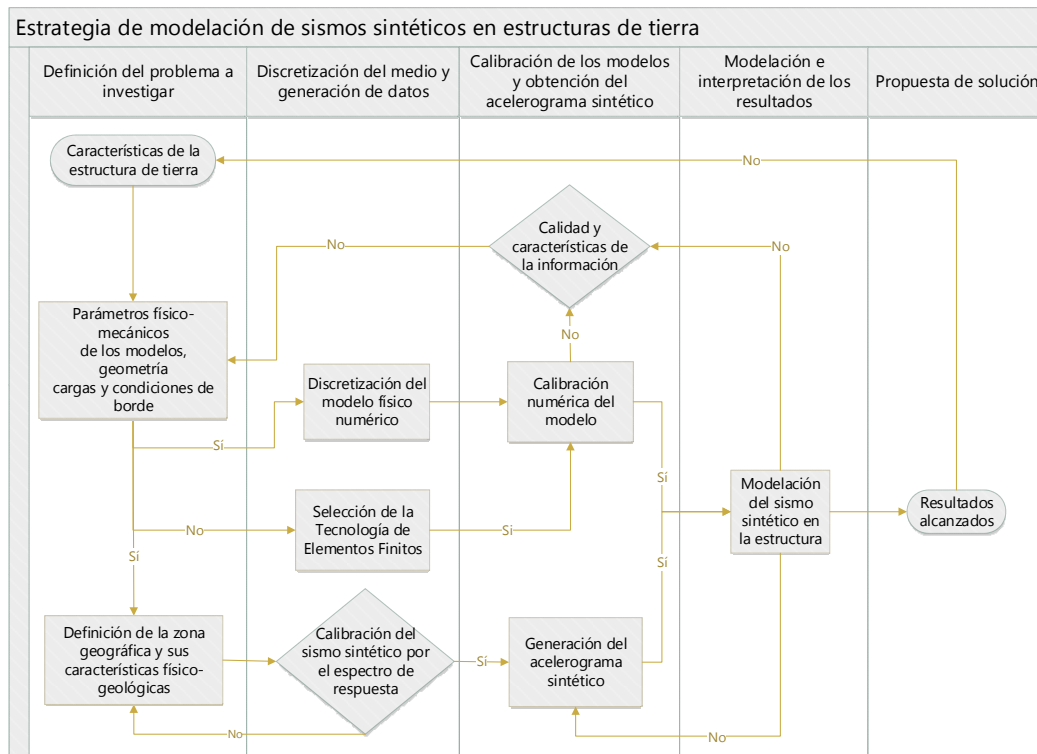


Fig. 1. Estrategia de modelación utilizada

En este caso fue considerado viable realizar las modelaciones con diferentes modelos de materiales (lineal-elástico, elasto-plástico, superficie de deslizamiento, etc.) durante el proceso de calibración y selección del modelo. Se determinó que para un valor de carga existe una deformación correspondiente inicial, así como un

estado tenso-deformacional asociado al proceso en sí mismo, asumiendo finalmente el modelo elasto-plástico como el más adecuado en función de la influencia del sismo en la estructura de tierra. Además, se hace referencia a los principales métodos de cálculo que fueron empleados en el proceso de estimación de los coeficientes del FS según se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Métodos de cálculos que se emplearon en los casos de estudio

Métodos utilizados	
Ordinario o de Fellenius (1927)	Morgestern y Price (1965)
Bishop simplificado (1955)	Newmark-Hall (1965)
Janbu simplificado (1968)	Método de los Elementos Finitos (MEF)

Como valor de referencia se consideran las propuesta realizadas por el “Manual de Diseño para Mecánica del Suelo, Cimentaciones y Estructuras de Tierra” de la Marina de los Estados Unidos de América [NAVFAC (DM-7.01)] [13] donde se establecen criterios del FS (tabla 2). Se tuvieron en cuenta además, las recomendaciones nacionales en el caso de los taludes de presa de tierra y terraplenes que están contenidas en normativas propuestas por Armas [14, 15] (tabla 3).

Tabla 2 Factores de seguridad según NAVFAC (DM-7.01)

Factor de Seguridad	Condición
$FS \geq 1,5$	Para situaciones permanentes.
$FS \geq 1,2$ o $1,3$	Para situaciones provisionales durante la construcción siempre y cuando se apliquen las medidas de control y seguimiento
$FS \geq 1,15$ o $1,20$	Para situaciones de carga accidental, como en el caso del sismo

Tabla 3. Factores de seguridad para presas y terraplenes [14]

Categoría	Tipos de suelos de la base		Condiciones de trabajo (FS)	
	Rocoso	No rocosa	Normales	Extraordinarias
I	$h > 100m$	$h < 50m$	1.35 - 1.25	1.15 - 1.10
II	$50m < h < 100m$	$25m < h < 50m$	1.25 - 1.15	1.15 - 1.10
III	$200m < h < 50m$	$15m < h < 25m$	1.20 - 1.10	1.10 - 1.05
IV	$h < 50m$	$h < 15m$	1.15 - 1.10	1.05

Para ejecutar la estrategia de modelación, se realizó una revisión inicial para obtener los parámetros físico-mecánicos de los materiales acorde con los coeficientes requeridos por los modelos constitutivos que se pretenden implementar. Se definieron las características geomorfológicas de la zona para generar un sismo probable geológica y geográficamente ajustado a la zonificación sísmica nacional [16].

En la segunda etapa se realiza una selección de la TEF en caso de que no exista un estudio o investigación previa que posea una discretización compatible a la plataforma computacional que se pretenda utilizar, dentro de un proceso que se puede ejecutar paralelo a la selección de la TEF mediante las recomendaciones comentadas por Álvarez y Mesa [17, 18].

En un tercer momento luego de haber realizado la calibración numérica del modelo de forma paralela, se genera el acelerograma sintético acorde con el espectro de respuesta dado por los parámetros físico-geográficos de la zona sísmica en la que se encuentra la obra. Procediendo al cuarto momento en el que se implementan las condiciones de frontera al modelo y se definen los métodos de análisis a utilizar en la modelación del sismo sintético.

Finalmente se pasa al módulo de propuesta de solución luego de simulado el sismo sintético y analizados los resultados alcanzados en el proceso de modelación con los registros tenso-deformacionales y factores de seguridad correspondientes a cada uno de los casos de estudio abordados.

RESULTADOS

Generación del sismo sintético

Para la generación del sismo sintético fueron utilizadas dos plataformas computacionales diferentes de código fuente libre: el Aceleros y el SIMQKE_GR [19, 20]. Los sismos fueron generados acorde con las zonas sísmicas del territorio nacional [16], según la ubicación geográfica de los casos de estudio.

Los casos de estudio son: Embalse Zaza ubicado en el municipio de la Sierpe en Sancti Spíritus, represando los ríos Zaza y Cayajaná; y Terraplén de enfoque para el vial Refinería-Calicito-CEN terraplén occidental del puente sobre el río Damují. La información correspondiente al Mapa de Zonificación propuesto y contenido en la NC-46:2013 por cada una de las zonas geográficas es la mostrada en la tabla 4.

Tabla 4. Peligro sísmico en las diferentes zonas del territorio nacional por municipios [16]

No.	Provincia	Municipio	c_mun.	S ₀ (g)	S _a (g)	S ₁ (g)	Tl(g)	Zona
82	Cienfuegos	Cienfuegos	607	0,153	0,272	0,044	3	1
91	Sancti Spíritus	La Sierpe	708	0,128	0,229	0,041	5	1

Zona 1: De peligro sísmico muy bajo sin efectos dañinos para las construcciones donde por lo general no es necesario tomar medidas sismorresistentes en estructuras y obras. No obstante, desde el punto de vista sismológico, no puede decirse que existe sismicidad nula. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima para el cálculo S_a estarán entre (0,10 – 0,30) g para periodos cortos (S_s) y entre (0,02 – 0,06) g para periodos largos (S₁).

Finalmente, para el trabajo investigativo, se generó un sismo de 10 s de duración para un 2 % y un 5 % de amortiguación en función de la respuesta espectral corregida para la zona característica de cada uno de los casos de estudio (figura 2) y los parámetros físico-mecánicos de los materiales utilizados en los modelos de los casos de estudio (tabla 5).

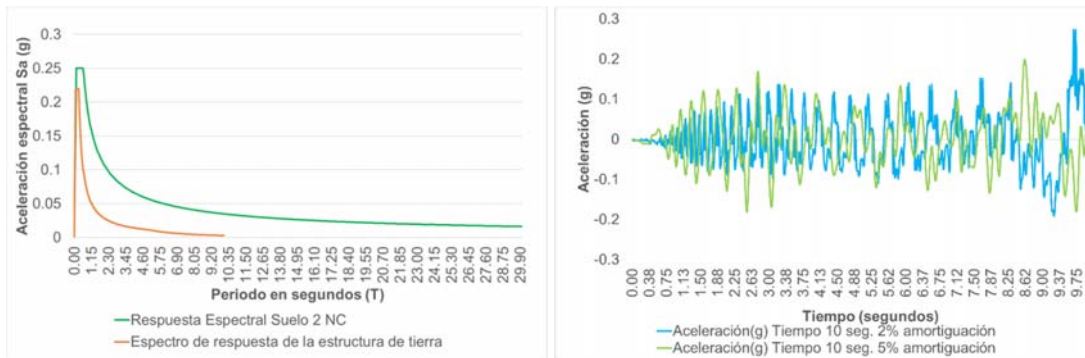


Fig. 2. Respuesta espectral corregida para zona sísmica 1 y acelerograma sintético para un sismo de 10 s al 2 % y 5 % de amortiguación

Tabla 5. Parámetros físico-mecánicos de los materiales utilizados en los modelos de los casos de estudios

Descripción	C (KN/m ²)	Θ (°)	γ (KN/m ³)	E (KN/m ²)	Coef. de Poisson	Kf (m/día)
Caso de estudio Embalse Zaza						
Suelo utilizado en la pantalla	18	16	19,8	20000	0,35	0,002
Suelo utilizado en el espaldón	19,2	28	20	30000	0,3	0,001
Filtro	20	50	20	50000	0,2	0,067
Suelo en la base	20	50	20	50000	0,2	0,001
Suelo en la base	10	18	20,1	78100	0,28	0,006

Casos de estudio. Terraplén de acceso para el vial Refinería-Calicito-CEN terraplén occidental del puente sobre el río Damují

El terraplén de carretera que se tomó como objeto de estudio (figura 3), presenta una altura máxima en su sección transversal de 7m, con una profundidad máxima de cimentación de 29 m. Las perforaciones ejecutadas [21] determinaron en el corte ingeniero-geológico: Material de relleno compactado arcillo – arenoso con abundantes gravas y fracción limosa; materiales incompetentes en la base como cienos y turbas, suelo limo – arcillo – arenoso, plástico, y con contenido de materia orgánica; y estrato resistente, suelo arcillo – areno fino – limoso con presencia de algunas gravas, plasticidad media a alta, calcáreo, consistencia media y de color verde – azuloso. El nivel freático se corresponde con el nivel del río en la localidad, aproximadamente desde la cota 0,00 m a la cota 0,20 m. El modelo numérico elaborado para la representación de la sección transversal del terraplén se muestra en la figura 4.

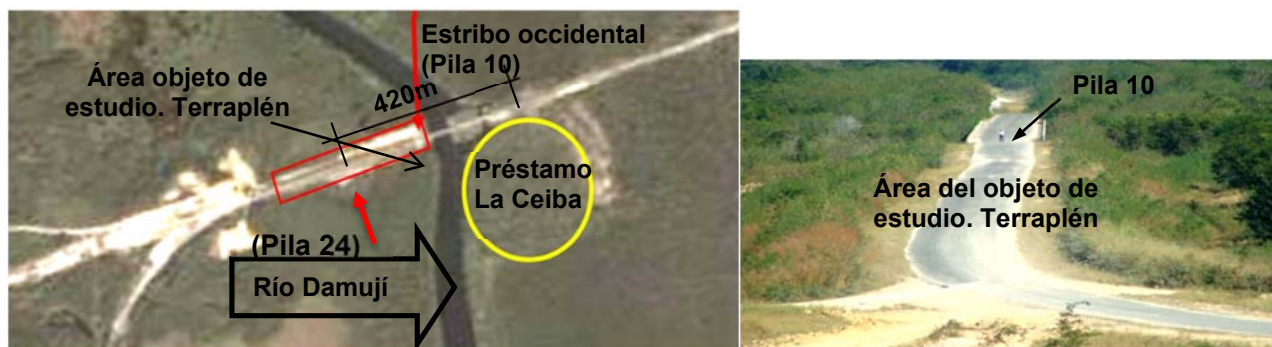


Fig. 3. Imagen satelital desde el Google Earth 2007 y Vista de Oeste a Este [22]

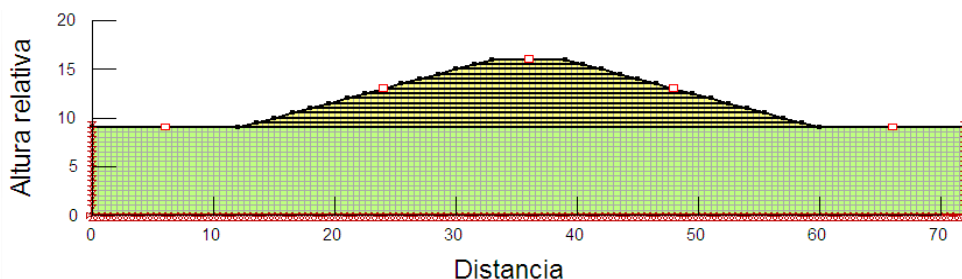


Fig. 4. Modelo numérico que representa la sección transversal del terraplén

En las figuras 5 y 6, se presentan los resultados del factor de seguridad vs aceleración promedio (g). Los resultados se muestran para el talud izquierdo y derecho del terraplén, ante la ocurrencia del sismo sintético para el 5 % y 2 % de amortiguación respectivamente. En la figura 7 se presenta el factor de seguridad promedio

obtenido según la aceleración del terreno promedio, donde se evidencia que estos valores de factor de seguridad promedio no sobrepasan los límites permisibles.

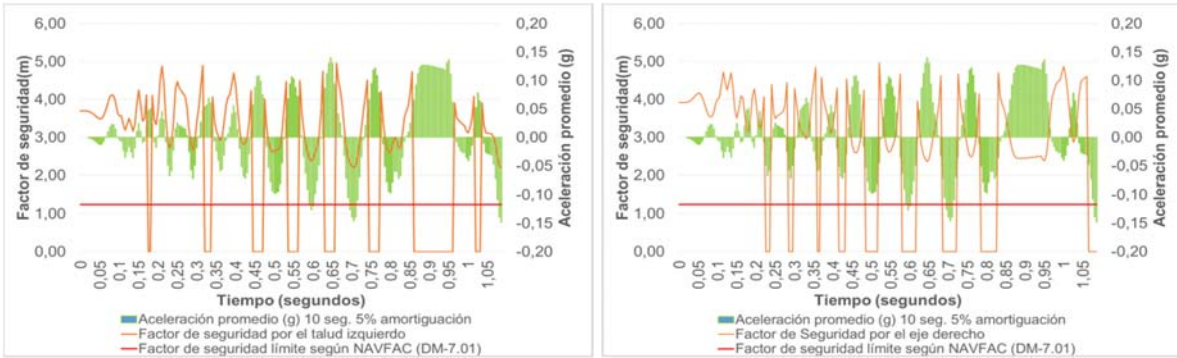


Fig. 5. Factor de seguridad para el sismo sintético de 10 s con una amortiguación del 5 %

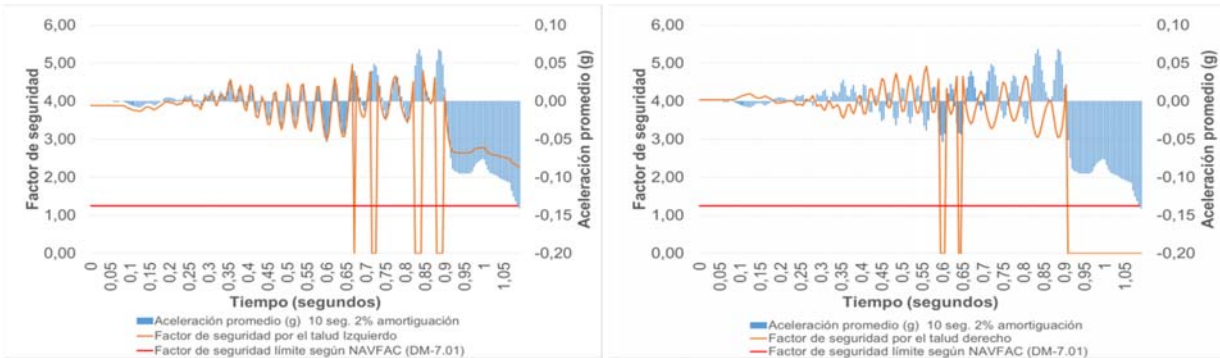


Fig. 6. Factor de seguridad para el sismo sintético de 10 s con una amortiguación del 2 %

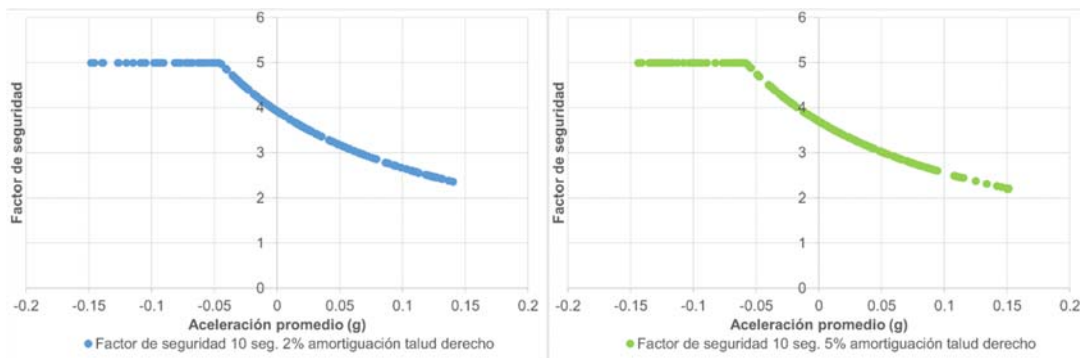


Fig. 7. Gráfico de dispersión del factor de seguridad contra la aceleración promedio para el sismo de 10 s con el 2 % y el 5 % de amortiguación en la corona del terraplén

Casos de estudio Embalse Zaza

El Embalse Zaza [se encuentra](#) ubicado en la Provincia de Sancti Spíritus a 10 km al sureste de la ciudad de Sancti Spíritus y 11 km al noroeste de Sierpe, siendo el mayor embalse del país, con las características de una presa de tierra homogénea terminada su construcción en 1975 (figuras 8 y 9).

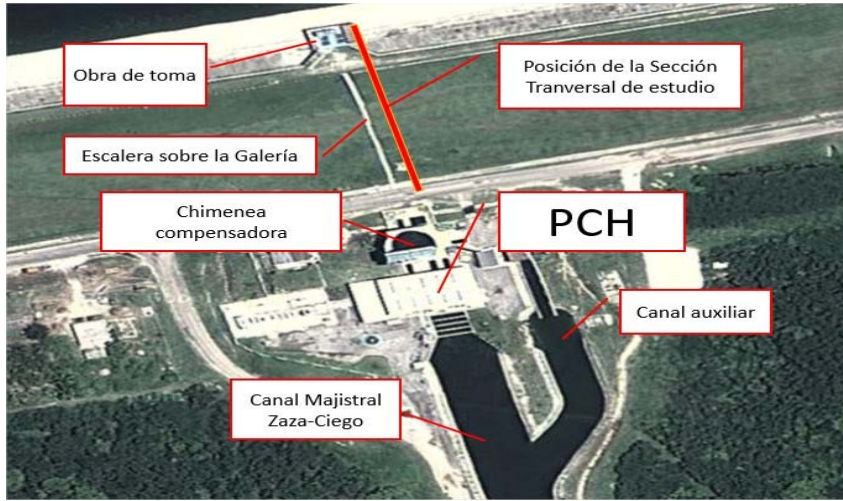


Fig. 8. Vista aéreo-satelital de la zona de estudio

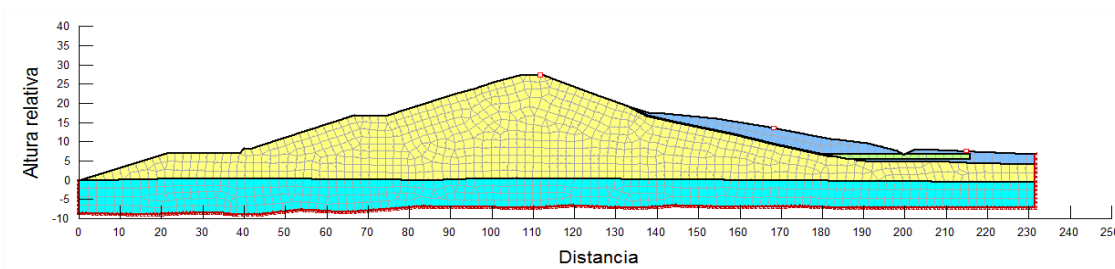


Fig. 9. Modelo numérico que representa la sección transversal de la presa

En las figuras 10 -13, se presentan los resultados de los desplazamientos en X e Y, y el factor de seguridad vs aceleración promedio (g) en el dominio del tiempo. Los resultados se muestran para el talud aguas abajo del embalse, ante la ocurrencia del sismo sintético para el 2 % y 5 % de amortiguación respectivamente, evaluado en la corona de la estructura de tierra.

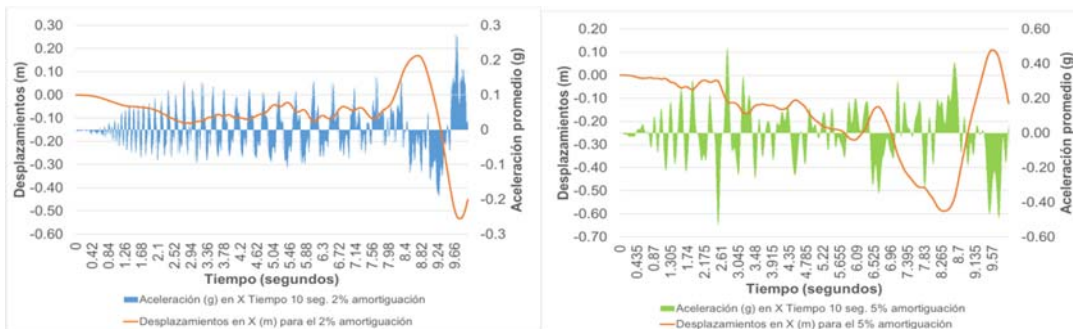


Fig. 10. Desplazamientos en x para el sismo de 10 s con el 2 % y el 5 % de amortiguación en la corona

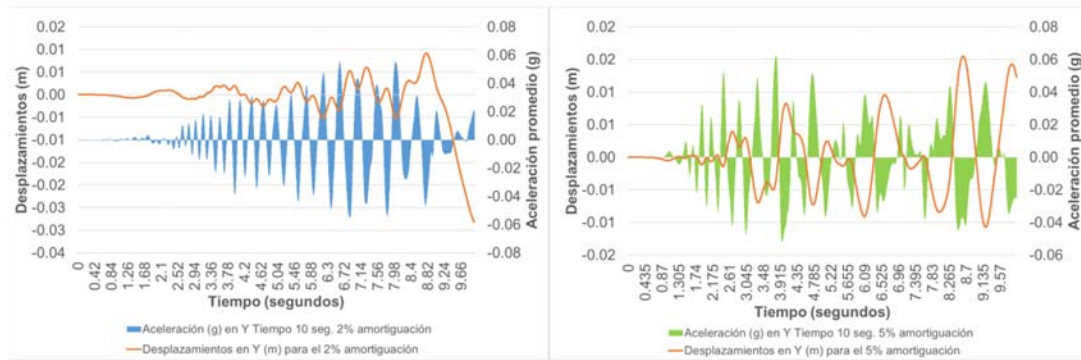


Fig. 11. Desplazamientos en y para el sismo de 10 s con el 2 % y el 5 % de amortiguación en la corona

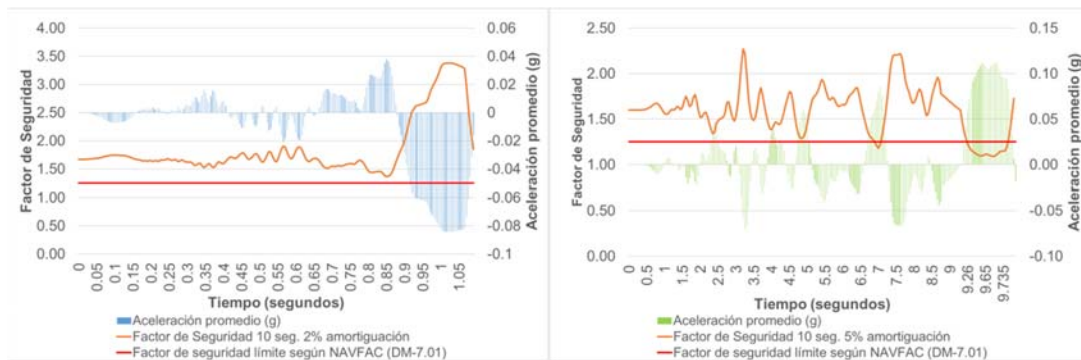


Fig. 12. Factor de seguridad para el sismo de 10 s con el 2 % y el 5 % de amortiguación en la corona

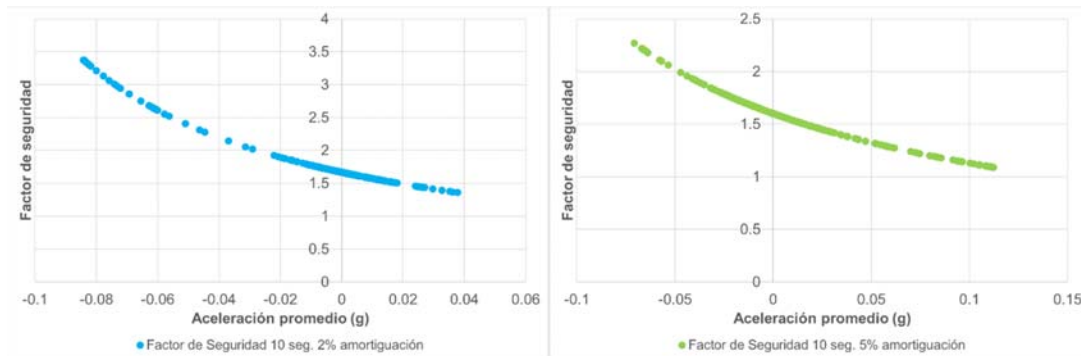


Fig. 13. Gráficos de dispersión del factor de seguridad contra la aceleración promedio para el sismo de 10 s con el 2 % y el 5 % de amortiguación en la corona de la cortina del embalse

DISCUSIÓN

Del análisis de los resultados alcanzados, se llega a las siguientes valoraciones: 1. Con amortiguación del 5 % el terreno presenta mayores aceleraciones que con la amortiguación del 2 %, presentando mayores puntos que fallan cuando se emplea el coeficiente de amortiguamiento del 5 %. 2. En el análisis de la estabilidad del talud izquierdo del terraplén, cuando la aceleración promedio del terreno alcanzó valores picos positivos, los factores de seguridad disminuyeron a cero. Sin embargo, en el análisis del talud derecho del terraplén, sucedió lo contrario. Los factores de seguridad fueron iguales a cero cuando los valores de aceleración promedio del terreno fueron negativos.

El análisis anterior conlleva a que, cuando la aceleración es en un sentido determinado, se afecta más el talud que se encuentra en esa dirección, ya que las partículas del suelo tienden a la separación, de lo contrario tienden a la consolidación de la estructura de tierra.

En el embalse el comportamiento de la estabilidad del talud con los valores picos positivos presenta registros inferiores a los límites admisibles por la norma a pesar de que no implica la falla del talud. El factor de seguridad promedio de las estructuras de tierra presentaron valores estables de forma general ante el comportamiento de las aceleraciones promedios (figuras 7 y 13) al tener en cuenta el estado tenso-deformacional del terraplén.

Además, el comportamiento de las probables fallas locales que se registran virtualmente durante la ocurrencia del sismo, al ser verificadas con las deformaciones diferenciales registradas en los puntos o zonas de origen de la falla y los desplazamientos, presentan valores discretos en sus componentes principales por lo que los materiales de las estructuras de tierra presentan un comportamiento lo suficientemente elástico para absorber y redistribuir las tensiones generadas por el sismo sin la aparición de grietas.

CONCLUSIONES

- La variante de amortiguación del 5 % muestra mayores registros de aceleración que el 2 % presentado, lo cual implica mayores zonas en el talud de fallas probables con asentamientos diferenciales locales.
- Para un sismo real con las características del sismo sintético generado en el presente trabajo, pudieran existir fallas locales del talud en el terraplén del vial analizado con deformaciones diferenciadas localmente, sin que esto implique una falla general del talud o grietas en su estructura.
- El FS que fue registrado durante la ocurrencia del sismo presenta una variación significativa en función de la dirección y sentido opuesto a la sollicitación impuesta al modelo durante el siniestro.

REFERENCIAS

1. Díaz M, Rivas M. Predimensionamiento y Cálculo de Estabilidad en Represas de Tierra. Departamento de Ingeniería Civil. Puerto La Cruz, Venezuela: Universidad de Oriente, Núcleo de Azoátegui, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, 2009
2. Ortiz WF. Estudio de Estabilidad de los Taludes de las Presas del Proyecto Pacalori, Teniendo en Cuenta la Acción Sísmica. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2014.
3. Lyapichev Y. Servicio de Validación del Diseño de la Presa Limón de Altura de 45 m (Construida) y 82 m (Sobreelevación Futura) para Escenarios Estáticos y Dinámicos. Informe Técnico (versión final). Lambayeque, Perú: Gobierno Regional de Lambayeque, Proyecto Especial Olmos-Tinajones, Proyecto Olmos, 2012.
4. Bertero R, Verri A, Lehmann A, Mussat J. Criterios para Construir el Espectro de Diseño Elástico y Seleccionar los Sismos de Diseño para un Sitio dado. Física de la Tierra 2009,11:81-111.
5. Botero E, Romo M. Modelo Bidimensional no Lineal para el Análisis del Comportamiento Dinámico de Estructuras Térereas. Revista de Ingeniería Sísmica 2006,74:1-32.
6. Álvarez M, Martínez J, Álvarez L. Simulación Físico-Numérica para Evaluar el Comportamiento Sismo Resistente en Presas de Tierra. Palacio de las Convenciones, La Habana, Cuba: VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra GEOCIENCIAS'2015, Evento: Sismología y Riesgos asociados, 2015.
7. Hernández A. Entrevista sobre la Prevención Sismológica en la Vulnerabilidad de los Embalses del Inrh en Cuba. Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos (IPH) de Villa Clara, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), 2013.
8. Hernández F. Asentamientos Permanentes por Sismo en Presas de Tierra y Enrocamiento, 2012. <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/5601>.
9. Moya A, Schmidt V. Informe Final: Simulaciones Numéricas para Sismos Fuertes de Costa Rica, Código: 731-A9-196. Costa Rica: Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica, 2012. http://www.lis.ucr.ac.cr/clase_index/tv/finales/pdf/17.pdf
10. Ruesta P, Díaz J, Alva J. El Coeficiente Sísmico en el Diseño de Presas de Tierra y Enrocado, Primera Ed. digital edn Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres: Lima, Perú, 2011. <http://www.guzlop-editoras.com/>.

11. Suárez J. Comportamiento Sísmico de los Taludes, Deslizamientos: Análisis Geotécnico, 1998. www.erosion.com.co
12. Álvarez M, Álvarez L, Martínez JE. Simulación de Patologías a obras Hidráulicas, Caso de Estudio Presa Zaza. La Habana, Cuba: Palacio de las Convenciones, GEOCIENCIAS' 2015, 2015.
13. Jones PJ. Soil Mechanics Design Manual 7.01 (Dm-7.01). In. Alexandria, Virginia, United State of America: Naval Facilities Engineering Command, 1986. 0525-LP-300-7056. <http://www.vulcanhammer.org>.
14. Armas R, Horta E. Presas De Tierra, Facultad de Ingeniería Civil del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echervarría (ISPJAE), Editorial ISPJAE: Ciudad de la Habana, Cuba, 1987.
15. Armas R. Guidelines for the Design of Earth Dams: Priority and Sequence. En. Ciudad de La Habana, Cuba: Civil Engineering Faculty, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echervarría (ISPJAE), 1990.
16. NC-46:2013. Norma Cubana Construcciones Sismorresistentes – Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción (NC). OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización (NC), 2013. <http://www.nc.cubaindustria.com.cu>.
17. Álvarez J, Mesa M, Recarey C. Técnicas de Calibración Numérica para Problemas de Ingeniería. Ciudad de La Habana. Cuba: Departamento de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría de la Habana (ISPJAE), Centro de Investigación de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMCNI). Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2012.
18. Mesa M, Álvarez J. Calibración Numérica de un Problema de Ingeniería Vial. Revista de la Construcción 2011,10(3):52-63. 0718-915X. Available en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2011000300006>.
19. Nigam NC, Jennings PC. Digital Calculation of Response Spectra from Strong-Motion Earthquake Records California Institute of Technology (Acelerogramas Sintéticos y Espectros De Respuesta). In. 1.0 ed. México, 2012. www.dinafacil.com.
20. Gelfi P. Simqke_Gr. Versión-2.7. Italia: University-of-Brescia, 2012. <http://civserv.ing.unibs.it/utenti/gelfi/>.
21. ENIA-CIENFUEGOS. Informe Técnico de Investigaciones Ingeniero Geológicas. 2009.
22. ENIA-CIENFUEGOS. Informe Técnico de Investigaciones Ingeniero Geológicas. Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas. INVESCONS. Unidad de Investigaciones para la Construcción Cienfuegos: Cienfuegos, 2009.