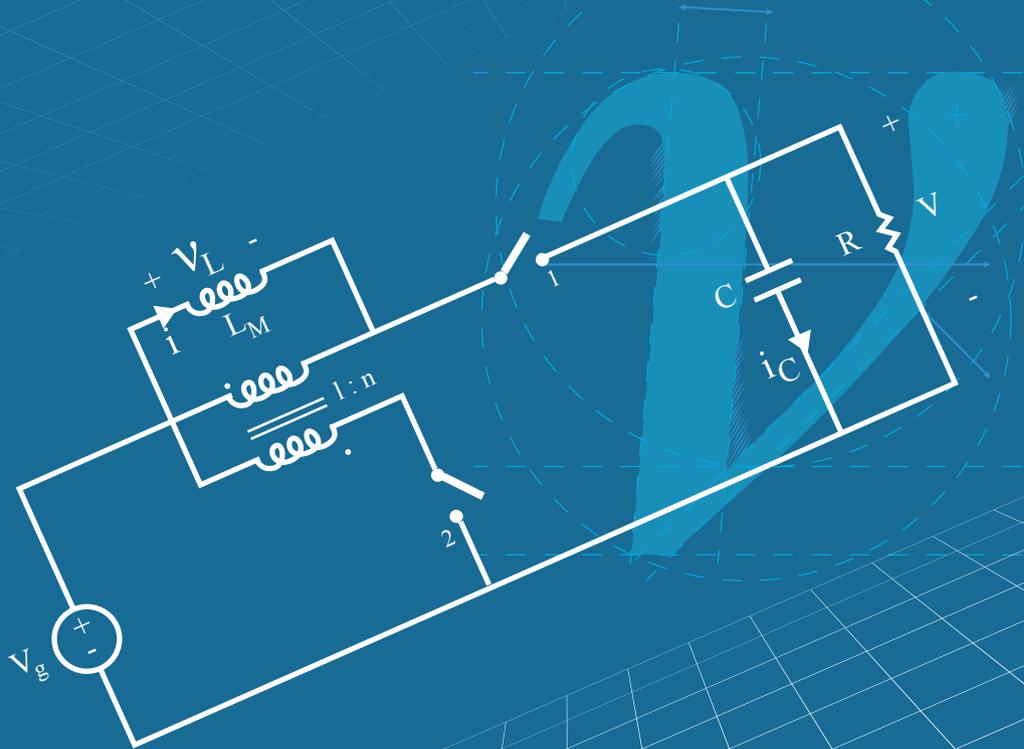


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
AGOSTO/DICIEMBRE 2012 - VOLUMEN 22 Número (2)



Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica
Volumen 22 – Agosto/Diciembre 2012 –Número 2

DIRECTOR

Ing. Juan Carlos Chaves De Oña, Ph. D.
Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad de Costa Rica

EDITOR

Ing. Manuel Montoya Maroto.
Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad de Costa Rica

CONSEJO EDITORIAL

Ing. Edwin Solórzano Campos, M. Sc. Decano de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica
Ing. Georges Govaere Vicarioli, Ph. D. Director del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica
Ing. Ronald Argüello Venegas, Ph. D. Profesor pensionado de la Universidad de Costa Rica
Ing. Juan Gabriel Monge Gapper, M. Sc., Profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica
Ing. Guillermo Santana Barboza, Ph. D. Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica
Ing. Juan Araque Skinner, M.Sc. Director de la Escuela de Ingeniería Topográfica, Universidad de Costa Rica
Ing. Manuel Molina Córdoba. Profesor de la Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica
Ing. José Miguel Mena Marín, MBA, GIP LTDA
Ing. Luis Diego Marín Naranjo, M. Sc., Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica
Ing. Rodolfo Herrera Jiménez, Ph. D. Profesor emérito de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica

CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica
Apartado Postal 11501-2060
Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

CANJES

Universidad de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información
Unidad de Selección y Adquisiciones-CANJE
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
Costa Rica

SUSCRIPCIÓN ANUAL:

Costa Rica: ₡ 4000,00
Otros países: US\$ 20,00

NÚMERO SUELTO:

Costa Rica: ₡ 2000,00
Otros países: \$ 20,00

Esta revista se encuentra indizada en Latindex,
Engineering Index y Compendex



Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica
Volumen 22 – Agosto/Diciembre 2012 –Número 2

Edición aprobada por la comisión de la Universidad de Costa Rica
© 2010 EDITORIAL UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Todos los derechos reservados conforme a la ley
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
San José, Costa Rica

Supervisión:

Ing. Juan Carlos Chaves De Oña, Ph.D.

Ing. Manuel Montoya Maroto, E.I.

D.I. Marcela Quirós Garita, M.Sc.

Colaboración:

Srta. Ingrid Vargas Romero, asistente de filología, estudiante de la Escuela de Filología de la Universidad de Costa Rica.

Srta. Ana Elizabeth González López, estudiante de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Costa Rica.

Diagramación:

Luis Arias Mesén.

Katherine Canales Montoya, estudiante de Artes Plásticas con énfasis en Diseño Gráfico de la Univesidad de Costa Rica.

Diseño de portada:

Luis Arias Mesén.

ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES BASADO EN DESEMPEÑO

Diego Cordero Carballo

Resumen

En los últimos años taludes y terraplenes se han visto afectados en diferente medida por sismos. Dependiendo de los daños, este tipo de obras geotécnicas pueden ser reparadas con relativa facilidad, por lo que es importante que las deformaciones y desplazamientos permanentes que puedan sufrir ante un evento sísmico sean menor que los límites permisibles para asegurar una rápida reparación. Para esto se propone se realice su análisis y diseño bajo conceptos de desempeño y no de esfuerzos permisibles. El uso de este enfoque en la ingeniería geotécnica sísmica se ha incrementado en los últimos años dado que ofrece una serie de ventajas sobre otros métodos, como flexibilidad, objetividad, consistencia y relevancia para las necesidades del ingeniero evaluador y del proyecto. Con los métodos usuales de análisis el desempeño es evaluado comúnmente en términos de la respuesta del sistema, utilizando medidas tradicionales del movimiento del terreno definidos por dos o más niveles de amenaza. El análisis basado en desempeño plantea que se permitan factores de seguridad menores que la unidad, manteniendo las deformaciones residuales y desplazamientos permanentes dentro de un rango permisible, de acuerdo a la importancia de la estructura y al riesgo que quiera asumir el ingeniero y el dueño de la obra. La deformación o desplazamiento residual calculado al finalizar el sismo se compara con un valor de referencia. Si el valor calculado es mayor que el límite permisible, el diseño original debe ser modificado.

Palabras clave: Análisis sísmico, estabilidad de taludes, desempeño

Abstract

In recent years, slopes and embankments have been affected to varying degrees by earthquakes. Depending on the damages, this type of geotechnical structures can be repaired with relative ease, hence it is important that permanent deformations and displacements that may occur after a seismic event be less than the allowable limits to ensure a prompt repair. It is proposed to make the analysis and design under concepts of performance and not of allowable stresses. The use of this approach in geotechnical earthquake engineering has increased in recent years because it offers several advantages over other methods, such as flexibility, objectivity, consistency and relevance to the needs of the evaluator and the project engineer. With the usual methods of analysis performance is commonly evaluated in terms of system response using traditional measures of ground motion defined by two or more levels of threat. Performance-based analysis suggests that safety factors less than unity are allowed, maintaining permanent residual deformations and displacements within a permissible range, according to the importance of the structure and the risk the engineer and the owner of the structure are willing to assume. The residual deformation or displacement calculated at the end of the earthquake is compared with a reference value. If the calculated value is greater than the allowable limit, the original design must be modified.

Keywords: Seismic analysis, slope stability, performance

Recibido: 26 de junio del 2012 · **Aprobado:** 22 de febrero del 2013

1. INTRODUCCIÓN

Un importante número de taludes y terraplenes destinados a infraestructura habitacional, industrial, de transportes, entre otros, se han visto afectados en diferente medida por sismos en el pasado. Dependiendo de los daños, este tipo de obras geotécnicas pueden ser reparadas con relativa facilidad, por lo que es importante que las deformaciones y desplazamientos permanentes que puedan sufrir a raíz de un evento sísmico sean menor que los límites permisibles para asegurar una reparación rápida. Para esto se propone se realice su análisis y diseño bajo conceptos de desempeño y no de esfuerzos permisibles, como se efectúa comúnmente.

Según Kramer (2011), el uso en la ingeniería geotécnica sísmica de análisis y diseños basados en desempeño se ha incrementado en los últimos años. El análisis y diseño basado en desempeño ofrece una serie de ventajas sobre otros métodos, como flexibilidad, objetividad, consistencia y relevancia para con las necesidades del ingeniero evaluador y del proyecto. Con los métodos usuales de análisis, el desempeño es evaluado comúnmente en términos de la respuesta del sistema, utilizando para esto medidas tradicionales del movimiento del terreno definidos por dos o más niveles de amenaza. Si bien esta práctica representa una mejora sobre otras más antiguas, no materializa todos los beneficios potenciales del análisis y diseño basado en desempeño.

Por ejemplo, en el caso de análisis de estabilidad de taludes el método pseudoestático sigue siendo una de las metodologías más utilizadas para evaluar la estabilidad de taludes o terraplenes sujetos a cargas sísmicas. No obstante, esta metodología no proporciona información sobre las deformaciones y desplazamientos permanentes inducidos por las fuerzas sísmicas. Más aún, es cuestionable el utilizar este enfoque cuando los sistemas geotécnicos son afectados por eventos sísmicos frecuentes, aunque sean de baja magnitud. Por esto, se considera necesario cambiar el enfoque de análisis pseudoestático a uno basado en desempeño.

2. ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES BASADO EN DESEMPEÑO

El principio convencional del diseño sísmico de taludes y terraplenes se ha basado en el concepto de

esfuerzos permisibles, utilizando como parámetro para verificar la viabilidad del diseño un factor de seguridad, FS, comúnmente calculado de la siguiente manera:

$$FS = \frac{\text{resistencia}}{\text{carga estática} + \text{carga dinámica}} \quad (1)$$

El cual debe ser mayor que la unidad. La Figura 1 muestra un esquema del método pseudoestático de estabilidad de taludes, basado en esfuerzos permisibles. En esta figura, k_w representa la carga sísmica o dinámica, w el peso de la masa deslizable y s la resistencia al corte a lo largo de la superficie de falla considerada.

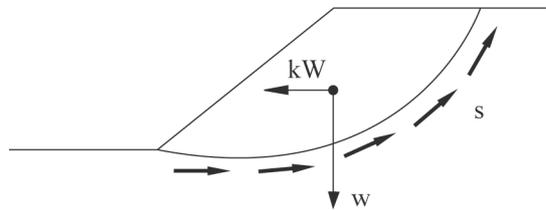


Figura 1. Esquema del método pseudoestático de estabilidad de taludes.

Fuente: Bray & Travarrou, 2011

El diseño sísmico basado en desempeño plantea que se permitan factores de seguridad menores que la unidad, manteniendo las deformaciones residuales y desplazamientos permanentes dentro de un rango permisible, de acuerdo a la importancia de la estructura y al riesgo que quiera asumir el ingeniero y el dueño de la obra. Dado que la carga sísmica no es de naturaleza estática, como se considera por ejemplo en el método pseudoestático, su influencia sobre las estructuras dura poco tiempo, y no causa una deformación o desplazamiento infinito, aún si el factor de seguridad es menor que la unidad.

El diseño basado en desempeño evalúa las deformaciones o desplazamientos residuales de una estructura de suelo bajo el efecto del movimiento del terreno por fuerza sísmica. Sucesivamente, la deformación o desplazamiento residual calculado al finalizar el sismo se compara con un valor de referencia. Si el valor calculado es mayor que el límite permisible, el diseño original debe ser modificado, caso contrario se puede aceptar.

3. ESCOGENCIA DEL COEFICIENTE SÍSMICO PARA UN ANÁLISIS BASADO EN DESEMPEÑO

La magnitud del coeficiente sísmico, que es aplicado a la masa potencialmente deslizante para representar el efecto desestabilizador de un sismo, es un componente crítico del procedimiento. La escogencia de este valor debería basarse en la amenaza sísmica y la cantidad de desplazamiento permanente que constituye un desempeño satisfactorio para el proyecto.

Si el valor del coeficiente sísmico, calculado bajo las premisas de desempeño, es utilizado en un análisis pseudoestático de estabilidad de taludes y el factor de seguridad es igual o mayor a la unidad, entonces el desplazamiento sísmico permanente será menor o igual al desplazamiento sísmico permisible. Bray & Travasarou (2009) plantean que el valor de coeficiente sísmico que considere la amenaza sísmica para el sitio del proyecto y los desplazamientos permisibles sea calculado de la siguiente manera:

$$k = e^{\left[\frac{-a + \sqrt{b}}{0,665} \right]} \quad (2)$$

$$a = 2,83 - 0,566 \cdot \ln(S_a) \quad (3)$$

$$b = a^2 - 1,33 \cdot \left[\begin{array}{l} \ln(D_a) + 1,10 - 3,04 \cdot \ln(S_a) + 0,244 \cdot (\ln(S_a))^2 \\ -1,5 \cdot T_s - 0,278 \cdot (M - 7) - \epsilon \end{array} \right] \quad (4)$$

Cuando $T_s < 0,05$ s, se debe cambiar el termino 1,10 por 0,22.

Donde:

k: coeficiente de fluencia (sin unidades)

T_s : periodo fundamental inicial de la masa deslizante (segundos)

S_a : aceleración espectral elástica con un 5% de amortiguamiento a un periodo de $1,5 \cdot T_s$

M: magnitud momento del sismo

D_a : desplazamiento sísmico permisible (centímetros)

Bray & Travasarou (2011) proponen calcular el coeficiente sísmico en función de la demanda sísmica esperada para el sitio del proyecto y el nivel deseado de desempeño del talud o estructura de tierra que se esté evaluando. Caso contrario a los procedimientos usualmente utilizados, se calcula el valor del coeficiente sísmico en función de los desplazamientos máximos permisibles y no, como es lo común, los desplazamientos en función del coeficiente sísmico, del periodo del terreno, de la aceleración espectral elástica, de la magnitud del sismo, y de otros parámetros.

El procedimiento propuesto por Bray & Travasarou (2011), aplicable a suelos cohesivos y no cohesivos se puede resumir de la siguiente manera:

- Evaluar si hay materiales que podrían perder resistencia significativamente como resultado del movimiento sísmico. Si hay presencia de estos materiales, enfocarse en evaluar su resistencia cortante cíclica. Utilizar resistencias post-sismo reducidas, de ser necesario. Generalmente, utilizar los valores mejor estimados de resistencia dinámica al corte para los estratos de suelo críticos que no presenten pérdida significativa de resistencia.
- Desarrollar el desplazamiento sísmico permisible (D_a , en centímetros) y el porcentaje de excedencia de este umbral de desplazamiento a través de consultas con el dueño del proyecto, considerando a la vez las consecuencias de desempeños desfavorables a desplazamientos mayores a este umbral.
- Estimar el periodo inicial de la masa potencialmente deslizante (T_s) utilizando la fórmula $T_s = 4H/V_s$, donde H representa la altura de la masa potencialmente deslizable y V_s es el promedio de la velocidad de onda cortante de la masa potencialmente deslizable.
- La demanda sísmica es definida en términos de la aceleración espectral de diseño para las condiciones de sitio bajo la masa deslizante al periodo degradado de la masa deslizante y la magnitud momento de diseño (M) del evento sísmico.
- Calcular el coeficiente sísmico utilizando la Ecuación 2 y aplicar este coeficiente sísmico en un análisis pseudoestático de estabilidad de taludes que satisfaga las tres condiciones de equilibrio. Si el factor de seguridad resultante es mayor o igual a la unidad, (se considera que el sistema se comportará satisfactoriamente)

dado que el desplazamiento permanente inducido sísmicamente calculado será menor que el desplazamiento considerado como permisible (D_a).

4. CONCLUSIONES

La extrapolación de las evaluaciones basadas en desempeño a otros tipos de análisis geotécnicos sísmicos es posible, pero requiere de modelos predictivos para daño y pérdidas. Conforme tales modelos sean accesibles, el análisis y diseño por desempeño producirá niveles de predicción de daños y pérdidas más realistas. En Costa Rica se requiere mayor investigación para definir, verificar y caracterizar los daños físicos asociados a diferentes niveles de respuesta.

El coeficiente sísmico utilizado en análisis pseudoestáticos de estabilidad de taludes debería ser seleccionado de una manera racional, ajustándolo a las condiciones de desempeño que se espera de una obra en particular. Para esto se debe considerar no solo la amenaza sísmica para el lugar donde se ubica la obra, sino también determinar el umbral de desplazamientos permanentes permisibles que representan un desempeño sísmico satisfactorio para el proyecto. Para esto es primordial la participación y criterio de un ingeniero especialista, que considere

explícitamente el criterio de desempeño del proyecto y la amenaza sísmica a la cual está sujeto.

BIBLIOGRAFÍA

- Bray, J. & Travasarou, T. (2009). Pseudostatic coefficient for use in simplified seismic slope stability evaluation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (9).
- Bray, J. & Travasarou, T. (2011, enero). Pseudostatic Slope Stability Procedure. En: *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Santiago, Chile
- Kramer, S. (2011, enero). Performance-Based Design in Geotechnical Earthquake Engineering Practice. En: *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Santiago, Chile

SOBRE EL AUTOR

Ing. Diego Cordero Carballo.

Magíster en Ingeniería Civil.

Ingeniero Geotecnista Independiente.

Correo electrónico: diego.cordero@yahoo.com