

Análisis de estabilidad cuasi-tridimensional de un talud de suelo empleando el método de elementos finitos: Autopista San Cristóbal – La Fría, Venezuela

Quasi-three-dimensional slope stability analysis using finite element method: San Cristóbal – La Fría Highway, Venezuela

Torres-Hoyer, Roberto^{1*}, Torres-Hoyer, Jesús¹ y Monsalve, María Laura

¹Departamento de Geomecánica, Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA)

Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes

Mérida 5101, Venezuela.

*thorj@ula.ve

Resumen

Los análisis de estabilidad de taludes se efectúan con la finalidad de alargar la vida útil de los mismos, estos pueden realizarse por dos métodos, el Método de Equilibrio Límite y el Método de Elementos Finitos. La investigación plantea analizar la estabilidad de un talud encontrado en el subtramo San Juan de Colón – San Félix de la Autopista San Cristóbal – La Fría, empleando el Método de Elementos Finitos. La metodología seguida inicia con una investigación documental y una fotointerpretación que permite, no sólo identificar geoformas que condicionen la estabilidad, sino verificar la geometría de los modelos y servir de base a los levantamientos de campo; durante los cuales se toman los datos necesarios para el análisis y se recopilan las muestras que se estudian en la etapa de laboratorio; los resultados de estos ensayos, junto con el modelo geológico establecido, son la base del análisis de estabilidad. El talud se analizó de forma cuasi-tridimensional, resultando que el mismo es inestable producto de la geometría de corte, dada las elevadas alturas y pendientes, aunado a la baja cohesión de los materiales.

Palabras clave: Suelo, propiedades geomecánicas, análisis de estabilidad de taludes, análisis cuasi-tridimensional, método de elementos finitos

Abstract

The slope stability analysis is performed in order to extend its useful life, they can be done by two methods, Limit Equilibrium Method and Finite Element Method. The research sets out to analyze the stability of a slope found in San Juan de Colón, San. Felix de San Cristobal Highway and La Fría, they are using the Finite Element Method. The methodology starts with research and a photo-interpretation that allows not only to identify landforms that condition stability, but verify model geometry and form the basis of field surveys, during which the necessary data are taken for the analysis and collected the samples studied in the laboratory stage, the results of these trials, along with the geological model established, are the basis of stability analysis. The slope was analyzed in a quasi-three-dimensional, resulting in the same product is unstable cutting geometry, given the high heights and slopes, coupled with the material's low cohesion.

Key words: Soil, geomechanical properties, slope stability analysis, quasi-three-dimensional analysis, finite elements method.

1 Introducción

Las obras de ingeniería civil, como carreteras, autopistas, vías férreas, entre otras, generan cambios en la geometría de las laderas, debiendo aplicarse la geotecnia para lograr que dichos cortes resulten estables. La estabilidad de

los taludes debe adecuarse a la vida, magnitud del proyecto, recursos disponibles, entre otros factores.

Actualmente la mayoría de los estudios de estabilidad se basan en los Métodos de Equilibrio Límite (MEL), donde se considera la relación entre las fuerzas deslizantes y resistivas a lo largo de una superficie dada. Sin embargo, en

los últimos tiempos se ha incrementado significativamente el uso del Método de los Elementos Finitos (MEF), el cual divide un cuerpo en formas geométricas simples o elementos, interconectados entre sí, para resolver de forma aproximada el conjunto; la principal ventaja de este método es que, considera las relaciones “esfuerzo – deformación”, por lo que una rotura no se da de forma instantánea, sino que es un proceso continuo.

Convencionalmente, los análisis de estabilidad se efectúan considerando perfiles bidimensionales a través o cerca del centro, puesto que para muchos autores representa la sección más crítica, sin embargo, otros señalan que la sección máxima de un posible deslizamiento no siempre es la del menor factor de seguridad, por esta razón Loehr, McCoy y Wright (2004) recomiendan efectuar los análisis en múltiples secciones bidimensionales a lo largo del talud a analizar, lo que corresponde a un análisis cuasi-tridimensional.

En la presente investigación se efectúa un análisis de estabilidad de un talud de suelo, ubicado en el subtramo San Juan de Colón – San Félix, de la Autopista San Cristóbal – La Fría, en el Estado Táchira, Venezuela, empleando el MEF

2 Antecedentes

Existen numerosos estudios donde se analiza la estabilidad de taludes en determinadas obras lineales, sin embargo son pocos los que presentan análisis cuasi-tridimensionales empleando el MEF. A continuación se destacan algunos trabajos de especial relevancia para esta investigación:

Infante y Torres (2004) analizan la estabilidad de taludes del Sector San José de las Flores y de la Antigua Facultad de Ingeniería (Mérida, Venezuela) en condiciones sísmicas empleando el MEF.

Monsalve (2006) presenta un análisis comparativo de la estabilidad de una ladera ubicada en el Sector La Trujillana, de la Autopista Rafael Caldera (El Vigía, Venezuela) a través del MEF y MEL.

Hammah R, Yacoub T, Corkum B y Curran J (2005) comparan los factores de seguridad emitidos por ambos métodos de análisis de estabilidad, evaluando adicionalmente la influencia de parámetros como módulo de Young, coeficiente de Poisson y ángulo de dilatación en el cálculo de factor de seguridad por el MEF, que se encuentran ausentes en el análisis por equilibrio límite.

Loehr, McCoy y Wright (2004), desarrollan un procedimiento de análisis de estabilidad cuasi-tridimensional de taludes para superficies de deslizamientos generales, en él presentan y comparan los análisis cuasi-tridimensionales con los tridimensionales existentes.

3 Ubicación del área de estudio

El área en estudio se encuentra entre las poblaciones

de San Juan de Colón y San Félix del Municipio Ayacucho del Estado Táchira, Venezuela, entre las coordenadas 0802458N, 0895520E y 0802906N y 0893999E en el Sistema Universal Transversal de Mercator (UTM), entre las progresivas 41+490 y 41+640 de la Autopista San Cristóbal – La Fría, las cuales se encuentran entre el sector 1 y 2 del subtramo IVb (Fig. 1).

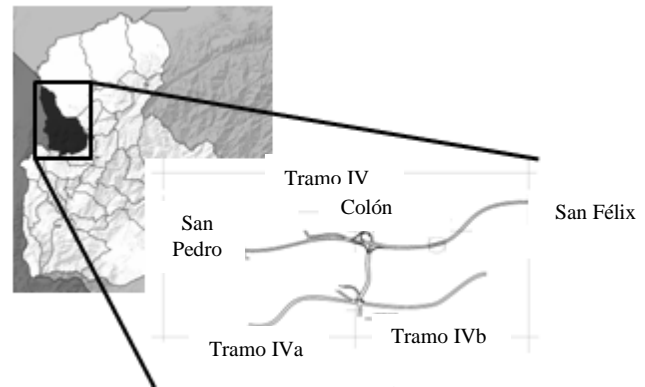


Fig. 1. Ubicación Referencial del Área de Estudio

4 Metodología

Esta investigación se efectúa siguiendo una secuencia metodológica que se divide en cuatro etapas, que se detallan a continuación:

4.1 Estudios preliminares

Consiste en la búsqueda de toda la información disponible sobre el proyecto y la zona en estudio. En esta etapa se analizaron las fotografías aéreas del área comprendida entre San Félix y San Juan de Colón (Estado Táchira, Venezuela), pertenecientes a la misión 0102127 del año 1978, escala 1:5000.

4.2 Levantamientos geológicos – geotécnicos de campo

En la etapa de campo, se verifica la información obtenida en la etapa previa, además de identificar los factores intervinientes en la estabilidad de los taludes.

Posteriormente, se recopilan los datos geológicos-geotécnicos propios del talud, para su caracterización a detalle y se realiza la toma de muestras para los correspondientes ensayos de laboratorio.

En la caracterización del talud se describe detalladamente el perfil de suelo transportado, realizando la zonificación correspondiente, atendiendo a los diversos estratos observados.

En cada estrato se realizan observaciones del tamaño de grano predominante, así como de su matriz, se identifica el grado de madurez textural y cualquier otro aspecto que destaque en diferencias de escogimiento y empaquetamiento del depósito.

4.3 Etapa de laboratorio

Se procesaron las muestras para obtener las propiedades geomecánicas: contenido de humedad natural, peso específico relativo de los sólidos, análisis granulométrico, límites de consistencia, peso unitario, corte directo y compresión simple. Los datos e interpretaciones correspondientes se realizan según lo propuesto por autores como Casteletti (1997), Ugas (1985), Bowles (1980).

4.4 Análisis de estabilidad por el método de elementos finitos

Según Chandrupatta y Belegundo (1999) un análisis por elementos finitos es una interacción lógica de tres etapas: pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento.

El pre-procesamiento implica la preparación de datos, tales como la geometría, las condiciones de frontera y la información sobre las cargas y el material. La etapa de procesamiento conlleva la generación y modificación de la matriz de rigidez así como la solución de las ecuaciones planteadas que resulta en la evaluación de las variables nodales y esfuerzos.

Por último, la etapa de post-procesamiento versa sobre la presentación e interpretación de resultados; aquí se muestra y analiza la distribución de esfuerzos, desplazamientos y deformaciones.

4.4.1 Geometría

El modelo consiste en secciones bidimensionales ubicadas en las progresivas 41+500, 41+540, 41+580 y 41+640. Ésta distribución obedece a los cambios significativos en el espesor de la terraza o donde se registran cambios en la pendiente de la ladera.

Una de las principales ventajas del análisis cuasi-tridimensional es el hecho de que la rasante tiene una pendiente, aquí considerada, que de haberse realizado un análisis tridimensional clásico, se debe obviar producto de las simplificaciones necesarias; otro punto a favor en este particular es que se consideran las variaciones en el ancho de la terraza, que en otro análisis debía considerarse constante, alterando significativamente la correspondencia con el medio geológico.

Para la división del modelo en elementos finitos se utilizaron elementos triangulares de seis nodos, cuidando las relaciones de aspecto para garantizar la confiabilidad de los resultados, para ello se realizaron refinamientos puntuales donde la relación mencionada no fuera la deseada, éstos básicamente se ejecutaron en las caras libres del talud y en los estratos de pequeño espesor.

El número de elementos utilizados varió según el modelo considerado, teniéndose 968, 833, 685 y 711 para las secciones 41+500, 41+540, 41+580 y 41+640 respectivamente.

4.4.2 Comportamiento mecánico de los suelos

El comportamiento mecánico asumido en esta investigación es idealmente plástico, lo que significa que el material continúa deformándose a un nivel de esfuerzos constante y que ningún cambio de volumen está asociado con la falla en progreso. El criterio de rotura asumido para estas simulaciones se basa en la propuesta de Mohr-Coulomb, la cual es la más aceptada para el comportamiento plástico de los suelos y asume una envolvente de rotura lineal en función de la cohesión (C) y ángulo de fricción interna (ϕ) del material (Casteletti, 1997; Das, 2001).

4.4.3 Cargas y condiciones de borde

Este punto es crucial en la simulación, puesto que las cargas y las condiciones de borde influyen en gran medida en los resultados obtenidos en el análisis numérico; en este sentido las cargas deben ser idénticas a las establecidas en la etapa de campo, y las condiciones de frontera deben ser diseñadas de forma tal que no se incurra en restricciones o libertades no consistentes con la realidad, para que no se pierda la correspondencia con el medio geológico.

En todos los modelos fueron considerados los pesos propios de cada material, en condición húmeda. No fueron aplicadas cargas adicionales por el hecho que el talud se encontraba libre de casas, vías de comunicación, o cualquier aspecto que pudiera representar sobrecargas.

Las condiciones de frontera impuestas consistieron en la restricción de los desplazamientos horizontales y verticales, así como los momentos en la base del modelo; en cuanto a las condiciones laterales se trató de no restringirlas debido al escaso ancho de la terraza en algunos sectores (Fig. 2).

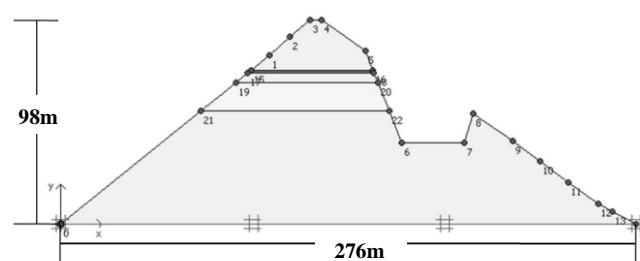


Fig. 2. Condiciones de frontera (anclaje en la base) donde el ancho de la terraza era mínimo

Sin embargo, cuando el ancho superaba el área afectada se restringieron los desplazamientos horizontales en los laterales del modelo (Fig. 3), lo cual no afecta los resultados por representar la continuidad del medio geológico.

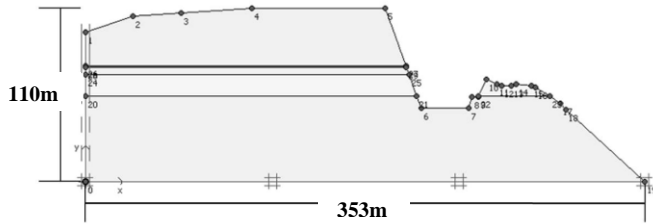


Fig. 3. Condiciones de frontera (anclaje en la base y rodillos en el lateral) donde el ancho de la terraza era importante

5 Resultados

5.1 Estudios previos

El análisis de las fotografías aéreas indica que la Autopista, en este tramo, corta dos clases de materiales, el primero corresponde a una secuencia de rocas de edad Terciaria y el segundo está representado por una serie de depósitos cuaternarios modelados en forma de terrazas

La primera zona es un área donde se presenta una secuencia de rocas sedimentarias (Formaciones Barco y Los Cuervos), donde existen numerosas evidencias de movimientos de masas, activos e inactivos, de escala variable.

La segunda zona, corresponde a depósitos cuaternarios de espesor y extensión considerable, los cuales suprayacen sobre la secuencia de rocas terciarias descrita, los cuales fueron modelados en forma de terraza que llegan a un nivel Q IV.

5.2 Descripción y zonificación del depósito cuaternario en el área.

El talud se caracteriza por ser un depósito de gravas, mal escogido, sin ordenamiento interno, de baja madurez textural, clastos matriz soportados, cuya matriz es arenolimsa, con un cuerpo arenoso limpio de color gris claro, cuyos contactos son abruptos. Este talud se dividió en cinco zonas (Fig. 4), cuya descripción de base a tope es la siguiente:

Inicialmente se presenta un suelo gravoso mal escogido, sin ordenamiento interno, de baja madurez textural, granos angulosos a subangulosos, clastos matriz soportados, cuya matriz es arenolimsa.

La segunda zona es idéntica a la primera, respecto a la geometría de los clastos, madurez textural, presencia de matriz, entre otras, la diferencia es el color y que en su interior se encuentra un lente arenoso, poco potente y de extensión lateral limitada.

La zona tres está constituida por un material idéntico al de la base del talud, en todos los sentidos. La cuarta zona corresponde a un cuerpo arenoso limpio de color gris claro, cuyo contacto es abrupto tanto en su tope como en su base.

Por último, se tiene una zona similar al material de la base y de la zona tres, la única diferencia encontrada fue el tamaño de los clastos que disminuía un poco.



Fig. 4. Trinchera de la Autopista San Cristóbal – La Fría, progresivas 41+490 a 41+640. Obsérvese la zonificación realizada

5.3 Identificación de factores intervinientes en la estabilidad de los taludes de suelos

5.3.1 Factores condicionantes

En los taludes de suelo, las diferencias en el escogimiento, compacidad y composición de la matriz predisponen zonas de debilidad que pueden generar inestabilidades. Los ensayos de laboratorio mostraron que los materiales son gravas y arenas densas, mal gradadas, poco cohesivas.

5.3.2 Factores desencadenantes

Los factores climáticos podrían acelerar o incluso desencadenar la rotura de los taludes. En estos modelos no se consideró este aspecto porque el material húmedo ya señalaba la posibilidad de rotura. La variación en la geometría es el principal factor desencadenante de una falla en estos taludes, puesto que la geometría de diseño del talud no es el más acorde.

5.4 Ensayos de laboratorio

En la Tabla 1 se muestran las propiedades geomecánicas empleadas en los análisis numéricos de las secciones consideradas, éstas se consideran isotrópicas para cada estrato.

Las propiedades provienen de los resultados de laboratorio realizados en esta investigación, salvo los indicados para la arena cuyos valores fueron tomados de los informes realizados por el Consorcio Beta Ingeniería – GEOTENSA (2005, 2006a, 2006b).

Tabla 1. Propiedades geomecánicas utilizadas

Material	γ_h (T/m ³)	E (MPa)	ν	ϕ (°)	C (KPa)	ψ (°)
A1	2,16	40,00	0,45	25,80	49,03	0,00
A2	2,16	40,00	0,48	38,81	17,65	8,81
Arena	2,00	40,00	0,30	45,00	19,61	15,00

5.5.1 Distribución de esfuerzos

Las distribuciones de esfuerzos normales muestran un incremento conforme se aumenta la profundidad, conforme a la presión litostática, alcanzándose valores máximos compresivos de 1,63x10³, 1,58 x10³; 1,48 x10³ y 1,58 x10³ KN/m².

Analizando la distribución de esfuerzos relativos de corte, parámetro que indica la cercanía del esfuerzo de corte calculado a la envolvente de rotura (Fig. 5), es posible observar que existen varias zonas con riesgo de plastificación, incrementándose éste conforme el ancho de la terraza disminuye (Secciones 41+640 y 41+580).

Esto es ratificado por la distribución de puntos plásticos (Fig. 6) donde se observa que la totalidad de los puntos plásticos se ubican en las regiones donde el esfuerzo relativo de corte alcanza su máximo valor.

5.5 Simulación numérica

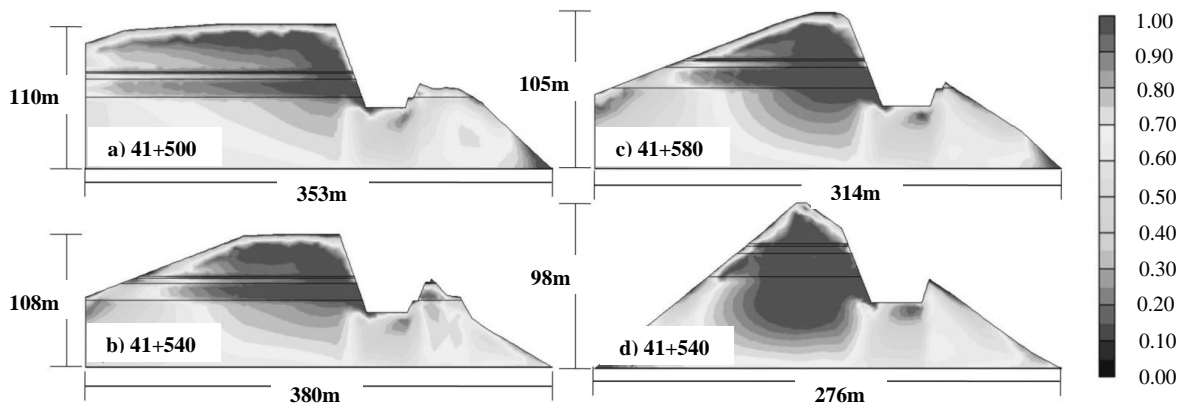


Fig. 5. Distribución de los Esfuerzos Relativos de Corte. El valor unitario indica la condición de rotura del material

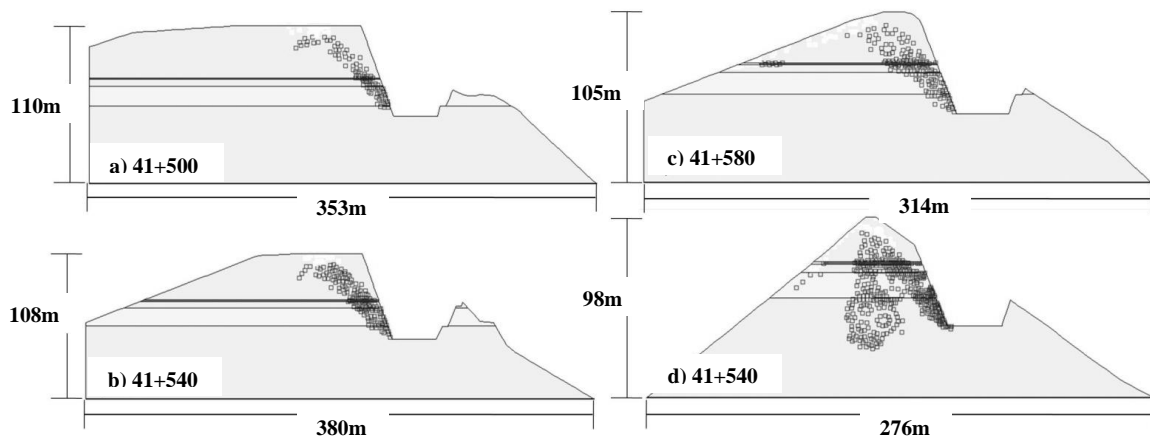


Fig. 6. Distribución de los Puntos Plásticos

5.5.2 Distribución de los desplazamientos

La figura 7, muestra la distribución de los desplazamientos horizontales en algunas secciones del talud, los máximos valores se ubican en el talud suroeste y se encuentran en la parte media del talud, por lo que el movimiento de masa que podría presentarse sería una rotura puntual que no afecta la totalidad del talud en un primer momento, no obstante la ocurrencia de este podría desencadenar una rotura mayor.

Por su parte, si se analizan los desplazamientos totales (Fig. 8) es posible identificar que los mismos se encuentran altamente influenciados por los horizontales, no obstante los valores de las partes superiores parecen indicar que una rotura puntual pudiera ser el factor desencadenante en un deslizamiento mayor, o que simplemente se presente un movimiento de masa importante, sin que sea necesario el movimiento puntual de forma inicial.

Los valores calculados, entre 40 y 49 cm, parecen elevados, sin embargo al tratarse de un modelo plástico, donde existe una elevada posibilidad de falla parecen.

5.5.3 Análisis de las deformaciones

En este talud resulta importante considerar las deformaciones de corte (Fig. 9), puesto que sus valores máximos alcanzan magnitudes entre 1.58 y 3.8%, típicos para deformaciones plásticas en la mayoría de los suelos, ratificado por la distribución de puntos plásticos del modelo (Fig. 6).

Esto adicionado al hecho que los mismos se ubican en una zona particular y describen una forma es curva, típica en la rotura de los suelos, permiten advertir sobre la posibilidad de un movimiento de masa limitado por la superficie descrita por las deformaciones de corte y puntos plásticos.

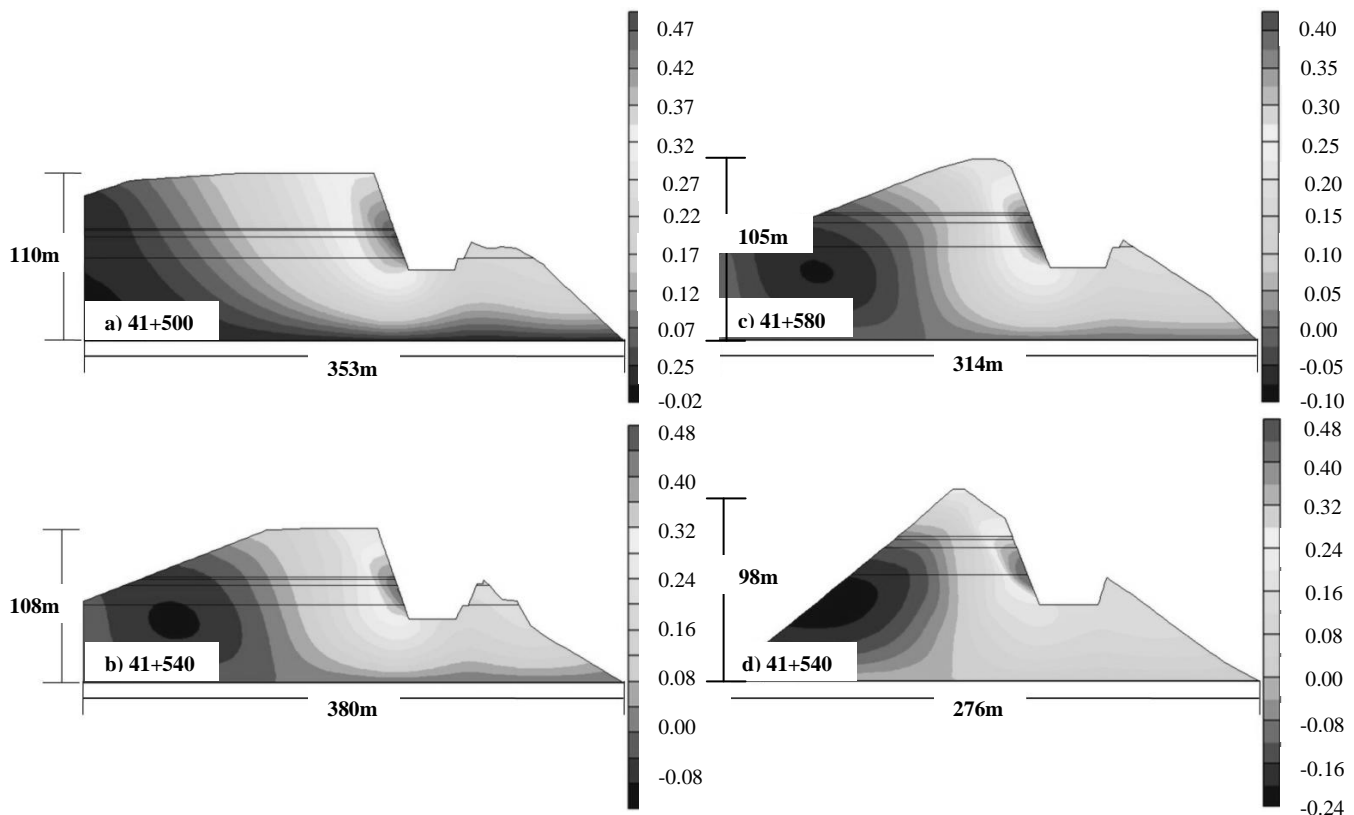


Fig. 7. Distribución de los Desplazamientos Horizontales. Valores extremos: a) 490,67E-03m, b) 449,06E-03m, c) 409,12E-03m, d) 442,04E-03m

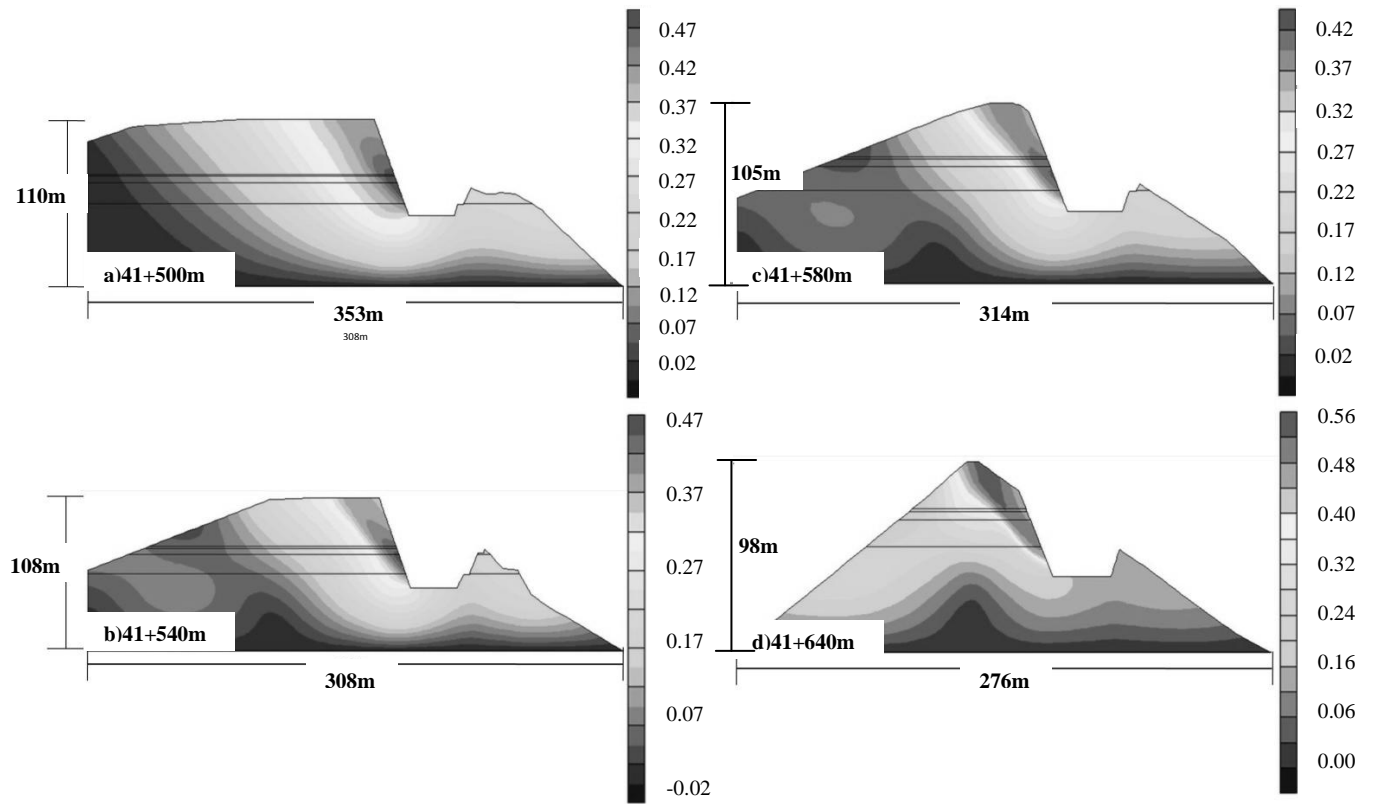


Fig. 8. Distribución de desplazamientos totales. Valores extremos: a) $498,05E-03m$, b) $464,19E-03m$, c) $431,7E-03m$, d) $547,51E-03m$

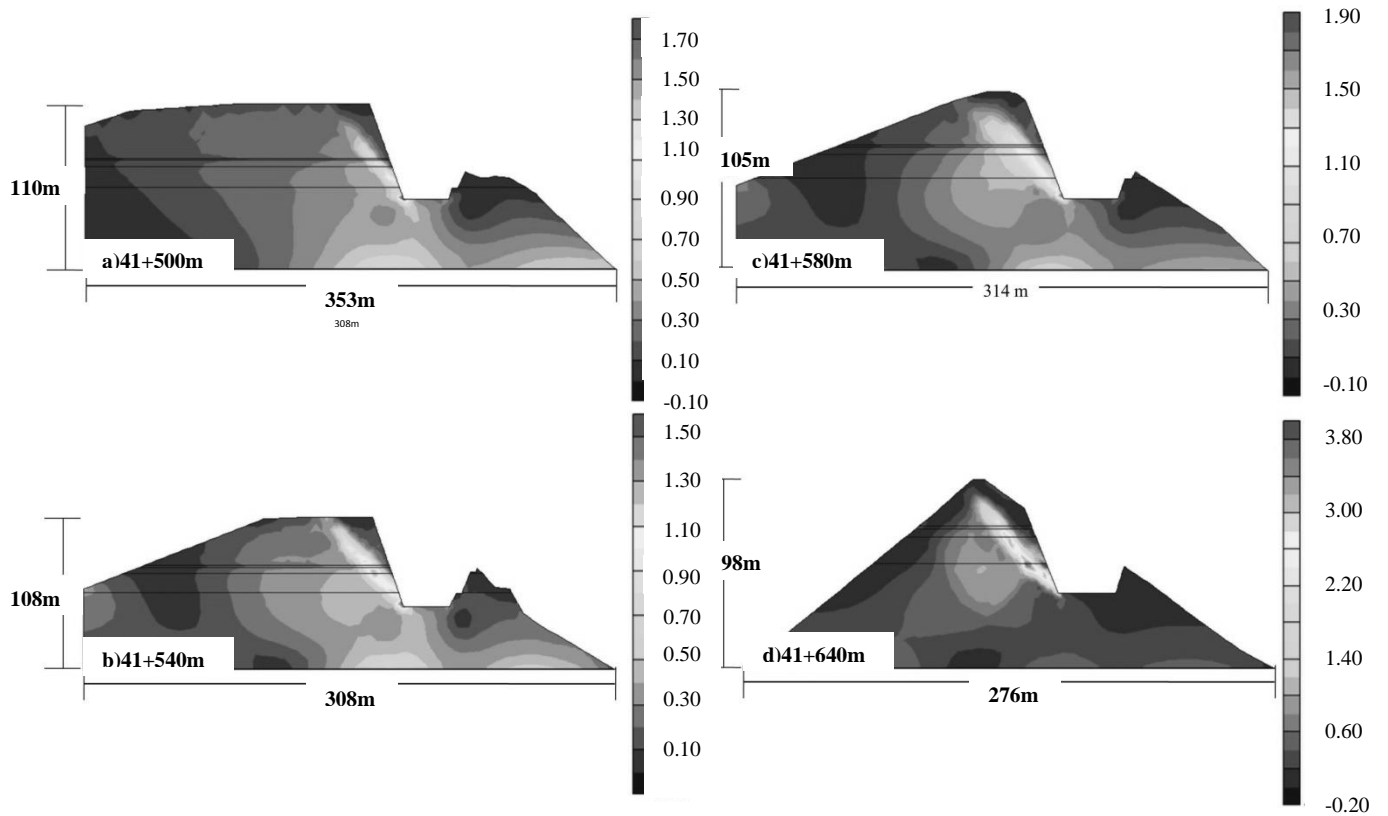


Fig. 9. Distribución de las deformaciones de corte. Valores extremos: a) 1,8%, b) 1,58%, c) 1,8%, d) 3,8%.

Finalmente, si se analizan en conjunto los resultados de las simulaciones, se puede establecer que existe la posibilidad de una falla en este talud, la misma puede ir desde pequeños movimientos en algunas capas; hasta un gran deslizamiento que afecte la totalidad del talud.

Conclusiones

El modelo presentado exhibe un comportamiento cónsono con la realidad observada en campo y los cálculos analíticos realizados para el esfuerzo normal considerando el peso húmedo de los materiales.

El cálculo del esfuerzo relativo de corte, sugiere la cercanía del punto estudiado con la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb. Estos perfiles, junto con la distribución de puntos plásticos sugieren la posibilidad de falla del talud suroeste.

Las deformaciones de corte, poseen valores altos para suelos, lo cual indica una posibilidad real de falla, adicionalmente la distribución de estas dentro del modelo sugieren la superficie de rotura típica para los suelos.

Los desplazamientos calculados, son cónsonos con los factores previamente mencionados, puesto que están limitados por la superficie potencialmente inestable. Éstos son un buen indicativo del posible movimiento de masa y sugieren desde un deslizamiento puntual en alguno de los estratos, hasta la falla general del talud suroeste.

Los análisis cuasi-tridimensionales vienen a representar una alternativa, dadas las limitaciones de los análisis bi y tridimensionales convencionalmente utilizados.

Considerando que la obra se encuentra aún en la etapa de construcción, se recomienda utilizar los resultados de esta investigación para evitar la rotura de los taludes entre las progresivas mencionadas

Referencias

- Bowles J., 1980, Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil, Arrieta, A., y Tamayo, J. (Trads.), Mc Graw-Hill, Bogotá.
- Casteletti J, 1997, Nociones de mecánica de suelos, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Consorcio Beta Ingeniería - GEOTENSA (Geotecnia y Tensores S.A), 2005, Estudio Geológico Preliminar del estribo sur del Viaducto La Colorada, Informe Interno del Instituto Autónomo de Vialidad del Estado Táchira, San Cristóbal, Venezuela, pp. 11.
- Consorcio Beta Ingeniería - GEOTENSA (Geotecnia y Tensores S.A), (2006a), Cimentación definitiva y accesos del viaducto La Colorada, Informe Interno del Instituto Autónomo de Vialidad del Estado Táchira, San Cristóbal, Venezuela, pp. 2.
- Consorcio Beta Ingeniería - GEOTENSA (Geotecnia y Tensores S.A), (2006b), Estudio Geotécnico para la cimentación del viaducto La Colorada, Informe Interno del Instituto Autónomo de Vialidad del Estado Táchira, San Cristóbal, Venezuela, pp. 6.
- Das B., 2001, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Thomson Learning, México.
- García R., 1979, Condiciones Geotécnicas Preliminares en el sitio del Viaducto sobre la quebrada La Colorada. Autopista San Cristóbal – La Fría. Km. 41+500 al Km. 42+250, Documento Interno de la Dirección de Obras Especiales del Ministerio de Transporte y Comunicaciones, Caracas, pp. 9.
- García R., 1983, Informe nº 2 para el estudio de las alternativas viales del Viaducto sobre La Colorada Autopista San Cristóbal – La Fría. Estado Táchira, Informe Interno de la Dirección de Obras Especiales del Ministerio de Transporte y Comunicaciones, Caracas, pp. 7.
- González L.I., Ferrer M., Ortuño L. y Oteo C., 2002, Ingeniería Geológica, Pearson Educación S.A., Madrid, 715 pp.
- Hammah R., Yacoub T., Corkum B., y Curran J. 2005, An comparison of Finite element slope stability analysis with conventional limit-equilibrium investigation. Se encuentra en www.roscscience.com/library/pdf/SSR_vs_LE.pdf, Fecha de consulta: 12 Agosto 2008.
- Hoek E, 2007, Practical Rock Engineering, Se encuentra en: http://www.roscscience.com/hoek/pdf/Practical_Rock_Engineering.pdf, Fecha de Consulta: 01 Septiembre 2008.
- Infante E. y Torres R., 2004, Influencia de las condiciones locales en la respuesta sísmica: Simulación geomecánica y aplicación a ejemplos naturales, Tesis de Pregrado, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica, Mérida, Venezuela. pp. 147.
- Loehr J.E., McCoy B.F. y Wright S.G., 2004, Quasi-Three-Dimensional slope stability analysis method for general sliding bodies, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, 130, pp. 551-560.
- Melentijevic S., 2005, Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Se encuentra en <http://oa.upm.es/722/01/04200507.pdf>, Fecha de Consulta: 21 Agosto 2008.
- Monsalve M., 2006, Análisis comparativo de estabilidad de la ladera ubicada en el Sector La Trujillana de la Autopista Rafael Caldera, El Vigía - Estado Mérida, mediante el Método de los Elementos Finitos y Equilibrio Límite, Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Postgrado de Matemática Aplicada a la Ingeniería. Mérida, Venezuela.
- Ugas C, 1985, Ensayos de Laboratorio en Mecánica de Suelos, discusión-evaluación y procedimiento, Tercera Edición, Caracas.

Recibido: 04 de febrero de 2012

Revisado: 12 de septiembre de 2012

Torres-Hoyer, Roberto: Profesor Instructor de La Universidad de Los Andes en las materias de Yacimientos Minerales y Elementos de Minería Perteneciente al Grupo de Investigación de Geología Aplicada GIGA.

Monsalve, María Laura: Ingeniero Geólogo, MSc en Matemática Aplicada a la Ingeniería. Libre ejercicio de la Profesión.

Torres-Hoyer, Jesús: Profesor Instructor de La Universidad de Los Andes en las materias de Mecánica de Suelos y Resistencia de Materiales, Perteneciente al Grupo de Investigación de Geología Aplicada GIGA.

