

Aplicación del método de elementos finitos en la simulación de zonas susceptibles a movimientos de masa en la franja costera del Estado Carabobo, Venezuela

Finite element method application to the simulation of areas susceptible to mass movements in the coastal of Carabobo state in Venezuela

Sosa, Grelys*; Alam, Maria; y Elberg, Maria

Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica,
Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Grupo de Investigación en Geología Aplicada
Mérida, 5101, Venezuela
*sosarely@ula.ve

Recibido: 05-12-2007

Revisado: 14-03-2008

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo principal simular las zonas de amenaza geológica en la franja costera del Estado Carabobo en Venezuela, utilizando el método de Elementos Finitos, para cuantificar los efectos de posibles movimientos de masa en el área. Los parámetros utilizados en la simulación son logrados ensayando en laboratorio muestras obtenidas en campo y caracterizando suelos y rocas de las zonas estudiadas. La metodología utilizada en esta investigación se desarrolla en cuatro etapas. La primera corresponde a la recolección de toda la información teórica referente al estudio, esto es, mapas, informes, trabajos de la zona y datos geomorfológicos. Seguidamente se realiza la etapa de campo donde se describen las condiciones geológicas existentes que permiten determinar las zonas más propensas a los movimientos de masa y donde se recolectaron muestras para realizar los ensayos. La tercera etapa se lleva a cabo en laboratorio obteniendo parámetros geomecánicos para la simulación. La última etapa corresponde a la creación de geometrías, verificación de condiciones de borde y cargas para generar los modelos de simulación con los valores obtenidos en laboratorio y las características litológicas presentes. Los resultados logrados en la investigación muestran zonas de peligro definidas y simuladas numéricamente donde se puede observar inestabilidad y amenaza en cuatro zonas principalmente. Se concluye en este estudio que los valores de componente de desplazamiento vertical, deformación unitaria elástica y esfuerzos de cizalla verifican áreas de inestabilidad lo que genera peligro a poblaciones cercanas y sus vías de acceso. Las zonas establecidas y sus efectos cuantificados son actualmente utilizados por la Corporación de Desarrollo de la Región Central de Venezuela, en el Plan de Ordenación del Territorio Venezolano

Palabras clave: Amenaza, geomecánica, simulación, elementos finitos.

Abstract

This investigation has as main objective to simulate the zones of geologic threat in the coastal strip of the Carabobo State in Venezuela, using the method of Finite Elements, to quantify the effects of possible mass movements in the area. The parameters used in the simulation are obtained from laboratory testing of rock samples obtained in field and characterizing soils and rocks of the studied zones. The methodology used in this investigation followed four steps. The first step corresponded to the collection of theoretical information referring to the study, such as maps, reports, works of the area and geomorphologic data. Next the field work was made where the existing geologic conditions defined the most prone zones to mass wasting and where samples were collected to for laboratory testing. The third stage was carried out in the laboratory where geomechanical parameters were obtained for the simulation. The last stage corresponded to the generation of geometries, verification of edge and load conditions of edge and loads to generate the simulation models in which the obtained values in

laboratory and lithologic characteristics were incorporated. The results obtained in this investigation show four main zones prone to mass instability. From this study, we conclude that the values of vertical component of displacement, elastic unitary deformation and shear stress may define areas of instability, which generate danger for near populations and their access facilities. The results of this study are incorporated by the Corporation of Development of the Central Region of Venezuela, in the Regulatory Plan of Arrangement of the Venezuelan Territory.

Key words: Threat, geomechanics, simulation, finite elements.

1 Introducción

En los últimos años Venezuela ha sido escenario de varios eventos que han desencadenado la muerte de muchos de sus habitantes así como cuantiosas pérdidas materiales; estos acontecimientos justamente están muy vinculados con procesos geológicos de diferente naturaleza, siendo los movimientos de masa, las inundaciones y los movimientos sísmicos los más comunes. La franja costera del estado Carabobo integrada por los municipios Juan José Mora y Puerto Cabello, actualmente presentan una problemática vinculada a procesos de naturaleza geológica, asociada a movimientos de laderas e inundaciones; estas últimas son muy comunes debido a la proximidad de estas localidades al mar. Ante la posible repetición y desencadenamiento de los mencionados eventos, es necesario un estudio que permita conocer la factibilidad de ocurrencia de sucesos de esta naturaleza y para esto lo más conveniente es emplear herramientas computacionales que permitan considerar parámetros geomecánicos para simular el comportamiento que pueda presentar un cuerpo al estar sometido a condiciones externas de esfuerzo, entre otras variables.

La simulación geomecánica emplea modelos numéricos para resolver de manera aproximada problemas de diversa índole. El método de Elementos Finitos es un método numérico que trabaja discretizando un elemento y generando una gran cantidad de ecuaciones algebraicas simultáneas, que son resueltas por medio de un computador y empleando un programa especializado para tal fin (Chandrupatla y Belegundu, 1999).

Este trabajo tiene por finalidad simular las zonas de amenaza geológica de la franja costera del estado Carabobo utilizando el método de elementos finitos a través del programa comercial ABAQUS, empleando parámetros geomecánicos obtenidos experimentalmente en el laboratorio, mediante muestras recolectadas en el campo.

2 Generalidades

Este proyecto de investigación nace a partir de necesidades reales que se presentan en el área de estudio, como respuesta a las posibles amenazas naturales que puedan afectar a los habitantes y transeúntes de la franja costera del estado Carabobo. Esta zona ha sufrido en los últimos años numerosos desastres naturales, en los cuales la población más afectada corresponde principalmente a personas de escasos recursos.

3 Ubicación del área de estudio

La franja costera del estado Carabobo, está conformada por los municipios Juan José Mora y Puerto Cabello; la zona de estudio fue delimitada en un área rectangular próxima a la costa localizada dentro de estos municipios, en la cual se identificaron aquellos sitios con mayor probabilidad a sufrir movimientos de masa e inundaciones. El área de estudio fue georeferenciada utilizando el sistema WGS 84, huso 19. Las coordenadas UTM del área seleccionada son: 573647, 1159997, 573647, 1153574, 615240, 1153674, 615240, 1159997. Fig. 1.

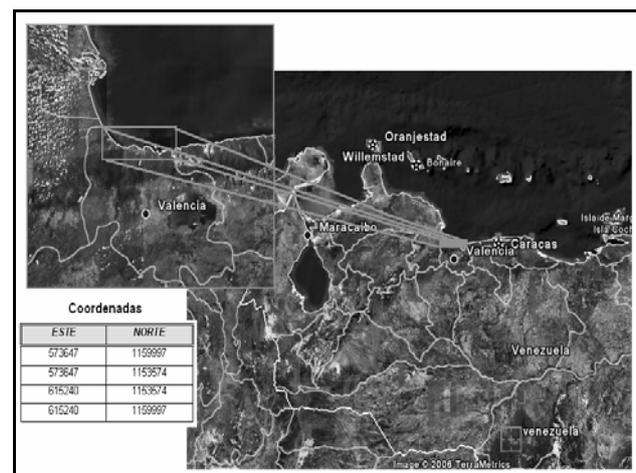


Fig. 1. Área de estudio (Tomado de Google Earth).

4 Método de elementos finitos

Es un método numérico empleado ampliamente en ciencias e ingeniería ya que permite resolver de manera aproximada, problemas de diversa índole, estudiándose procesos como esfuerzos de tensión, transmisión de calor, comportamientos reológicos, etc., en medios continuos. El método inicialmente discretiza el sólido para adaptarlo a un número finito de partes llamadas elementos, los cuales, tienen una serie de puntos interconectados entre si llamados nodos, estos están colocados en las esquinas de los elementos, también en los puntos medios de las caras o aristas y dentro de ellos. Al ensamblaje de elementos-nodos se le conoce como malla o mallado.

La interpolación es un elemento clave del método de

elementos finitos, ya que a través de este procedimiento se pueden determinar todos los desplazamientos que ocurran en cualquier zona del modelo. Esta interpolación se lleva a cabo mediante funciones que reflejan el movimiento de los nodos, y éstas son consideradas como funciones de forma, las cuales, pueden ser calculadas ya sea por el uso de derivadas e integrales o éstas pueden constituir polinomios completos que reflejen la movilidad de dichos nodos. La complejidad de las ecuaciones que se utilizan en este método cambia según si el estudio es unidimensional, bidimensional o tridimensional, ya que una de las variables fundamentales a la hora de analizar las deformaciones son los desplazamientos, denotados con la letra **u**, por tanto, el análisis matricial es mucho más sencillo para estudios unidimensionales que sólo conllevan movimientos en la dirección del eje X, mientras que para estudios bidimensionales y tridimensionales las ecuaciones se complican al considerar desplazamientos en u_x y u_y o u_x , u_y y u_z respectivamente (Chandrupatla y Belegundu, 1999). Por ejemplo, en el estudio de la rigidez directa en resortes, para un elemento cualquiera, la matriz de rigidez [k] está relacionada con los desplazamientos nodales en una dimensión {u} estableciendo el valor de las fuerzas locales que actúan sobre el resorte {f}, esto es:

$$\{f\} = [k] \{u\} \quad (1)$$

En este caso (unidimensional) la ecuación 1 se resuelve de manera directa como si fuese un producto. Sin embargo, para el caso de un elemento bidimensional el desplazamiento **u** no se expresaría como un módulo sino como un vector con coordenadas en (x) y (y), es decir, la fórmula sería ahora:

$$\{f\} = [k] \{u_x, u_y\} \quad (2)$$

5 Abaqus

Es un programa de análisis basado en el método de elementos finitos. Este software permite resolver problemas de mecánica de sólidos, ya sean lineales o no lineales, en los rangos estático y dinámico. Incluye modelos de material de tipo elástico, elastoplástico y viscoplástico, entre otros. Está constituido por una serie de módulos que permiten el pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento de la información. Entre estos, los más utilizados son los módulos ABAQUS/Cae, ABAQUS/Standard y ABAQUS/Viewer (ABAQUS, 2002).

6 Metodología

La metodología utilizada en esta investigación se desarrolla en cuatro (4) etapas. La primera corresponde a la recolección de toda la información teórica referente al estudio, esto es, mapas, informes, trabajos de la zona y datos geomorfológicos. Seguidamente se realizó la etapa de cam-

po donde se describieron las condiciones geológicas existentes que permitieron determinar las zonas más propensas a los movimientos de masa y donde se recolectaron muestras para realizar los ensayos. La tercera etapa se llevó a cabo en laboratorio obteniendo módulo de elasticidad, relación de poisson y densidad, principalmente. La última etapa corresponde a la creación de geometrías, verificación de condiciones de borde y cargas para generar los modelos de simulación con los parámetros geomecánicos y características litológicas obtenidas.

6.1 Fase preliminar

Práctica de ejercicios en ABAQUS, recopilación e interpretación de información bibliográfica, cartográfica y fotogeológica. Entre los mapas e informes consultados se pueden mencionar:

- Mapa político de los municipios Puerto Cabello y Juan José Mora. Estado Carabobo. Escala 1:100.000.
- Mapa geológico de la región de Morón. Hoja 6547-II-NO. Escala 1:25.000. Elaborado por FUNVISIS.
- Mapa geológico de la región de Urama. Hoja 6547-III-NE. Escala 1:25.000. Elaborado por FUNVISIS.
- Mapa geológico de la región de Borburata. Hoja 6647-III-NO. Escala 1:25.000. Elaborado por FUNVISIS.
- Mapa topográfico de la región de Puerto Cabello. Hoja 6547-II-NE. Escala 1:25.000.
- Mapa topográfico de la región de Urama. Hoja 6647-III-NE. Escala 1:25.000.
- Mapa topográfico de la región de Morón. Hoja 6547-II-NO. Escala 1:25.000.
- Mapa topográfico de la región de Borburata. Hoja 6647-III-NO. Escala 1:25.000.
- Reconstrucción del cauce del río Alpargatón motivado a la avenida de lluvias producidas en el mes de febrero 2005. Municipio Juan José Mora, Estado Carabobo. Informe técnico.

Se utilizaron además ortofotomapas a escala 1:25.000, cuyas hojas corresponden a los números 6547-I-NO; 6547-I-SO; 6547-II-NE y 6647-III-NO; con la finalidad de identificar controles estructurales, vegetación, geometría y tipos de drenaje predominante, para definir litología reinante, así como los principales ríos y zonas propensas tanto a inundación como a movimientos de masas.

6.2 Fase de campo

En esta etapa se efectuó un reconocimiento del área de estudio y conjuntamente con la información bibliográfica obtenida en la fase preliminar se determinaron los aparentes taludes estables e inestables, con la finalidad de seleccionar las zonas propensas a experimentar movimientos de masa las cuales serían posteriormente simuladas, una vez elegidas las mismas, se procedió a efectuar el levantamiento geológico correspondiente; para esto, se describen los afloramientos, (identificación de litologías existentes, estructu-

ras geológicas presentes, se mide rumbo y buzamiento de foliación) y finalmente se toman muestra de roca y suelo para ser ensayadas en laboratorio.

6.3 Fase de laboratorio

Durante esta etapa se realizaron ensayos de compresión uniaxial a rocas y suelo, clasificación granulométrica, contenido de humedad, determinación de límites de consistencia, corte directo, descripción petrológica, elaboración de secciones finas y descripción petrográfica, para determinar los parámetros geomecánicos que deben ser incluidos al programa y comprobar la litología existente.

6.4 Fase de simulación

En esta fase se usa el software ABAQUS para diseñar los modelos, lo cual implica la creación de partes, secciones, materiales y mallado; posteriormente se asignan estas características al modelo inicialmente diseñado, se aplican las cargas y se analizan las geometrías mediante el método de Elementos Finitos.

Modelo 1

Este modelo representa una colina localizada en Puerto Cabello, en el sector Fortín Solano de coordenadas UTM 0607533 – 1156628; 0607963 – 1156389. Esta colina ha sido dividida en 8 secciones (Fig. 2), las cuales se crean para asemejar o modelar la foliación que presenta el macizo rocoso, que está compuesto esencialmente por dos tipos de materiales que representan rocas esquistosas. Este modelo es empotrado únicamente en la base del mismo, restringiéndose de esta forma cualquier movimiento que pueda presentarse al pie de la colina; los desplazamientos en la dirección Oy (vertical) como en la dirección Ox (horizontal) son permitidos. Las cargas asignadas corresponden a la acción de la gravedad sobre los materiales rocosos que integran la colina (Fig. 3).

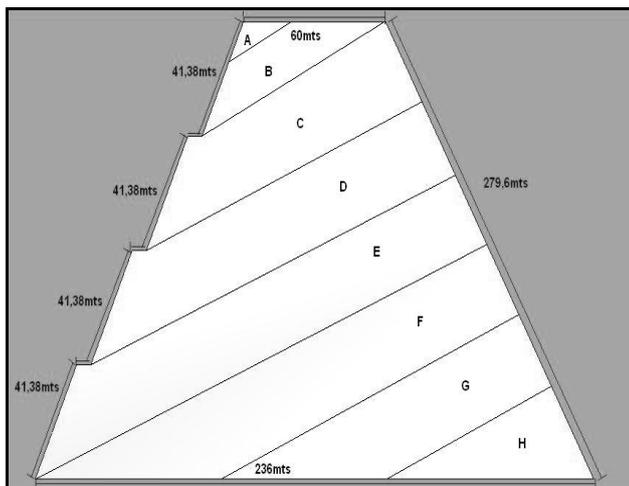


Fig. 2. Geometría para el modelo 1.

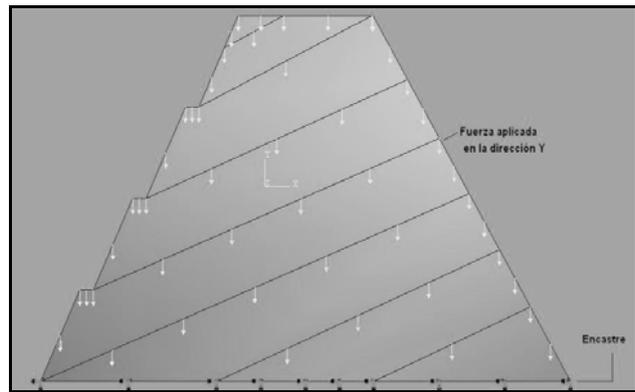


Fig. 3. Condiciones de borde y cargas aplicadas al modelo 1.

Tabla 1. Parámetros geomecánicos asignados al modelo 1

Material	E (Pa)	ν	ρ (kg/m ³)
A	3,822 E+10	0,31	2700
B	3,7604E+09	0,00001	2940
C	3,5655E+09	0,020	2863
D	5,7604E+09	0,0001	2940
E	5,5655E+09	0,3	2863
F	7,7604E+09	0,001	2940
G	7,5655E+09	0,04	2863
H	9,7604E+09	0,01	2940

Modelo 2

Este modelo representa un talud localizado en Puerto Cabello en las cercanías a la empresa Dianca (Fig. 4), de coordenadas UTM 0611085 – 1156715; 0611034 – 1156558. Este talud está conformado al igual que el modelo anterior esencialmente por dos tipos de rocas esquistosas. La carga aplicada sobre este modelo está referida a la fuerza de la gravedad. Para este modelo, se restringe cualquier tipo de desplazamiento en la base del mismo, donde el basamento se mantiene fijo, por lo cual es empotrado; el desplazamiento en la dirección Ox también es limitado, asignándose rodillos al lado izquierdo del talud (Fig. 5).

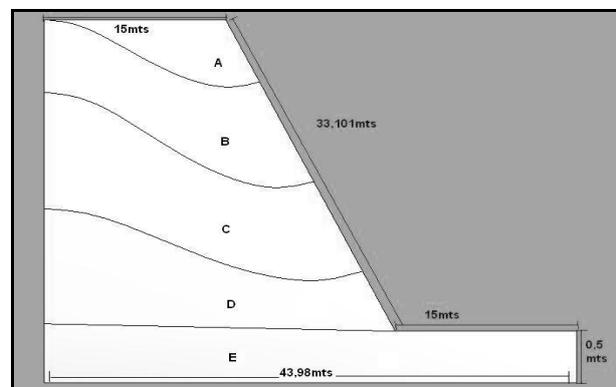


Fig. 4. Geometría para el modelo 2.

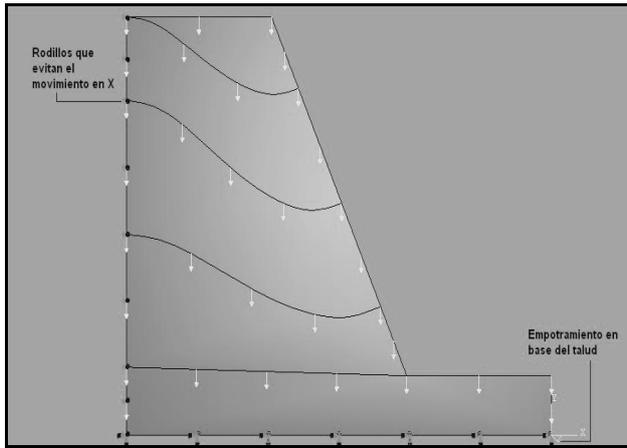


Fig. 5. Condiciones de borde y cargas aplicadas al modelo 2.

Tabla 2 Parámetros geomecánicos asignados al modelo 2

Material	E (Pa)	ν	ρ (kg/m ³)
A	9,3817 E+08	0,00001	3378
B	5,8851 E+12	0,050	3000

Modelo 3

El modelo corresponde a una colina ubicada en el municipio Juan José Mora, sector Los Róbalos, hacia Canoabo, específicamente en la progresiva 2000 +700 de la vía Local 004 (Fig. 6). Este modelo representa un macizo con rocas que tienen una dirección de foliación a favor de la pendiente del talud, lo cual contribuye al movimiento del material que allí se encuentra; se consideraron tres materiales diferentes en dicho modelo. El material 1 está caracterizado por las propiedades geomecánicas obtenidas en el laboratorio mediante el análisis de una muestra de roca alterada, al material 2 se le asignaron medidas teóricas para definir sus propiedades y estos valores generalmente corresponden a rocas no alteradas, es decir, a rocas frescas, las cuales poseen módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson mayores que los de las rocas alteradas, el tercer material corresponde al concreto que se encuentra en el muro de contención que está junto a la calzada. Se aplicó una fuerza másica o de cuerpo a todo el modelo, efecto que la gravedad ejerce sobre los materiales. La parte inferior del macizo rocoso fue empotrada, se colocaron rodillos en el lateral derecho del macizo que se encuentra unido al resto de la colina, para garantizar la continuidad del medio, permitiéndose solamente movimientos verticales para poder observar los desplazamientos que ocurren debido al efecto de la gravedad sobre el peso de las rocas (Fig. 7).

Modelo 4

Este modelo corresponde al dique situado en la pobla

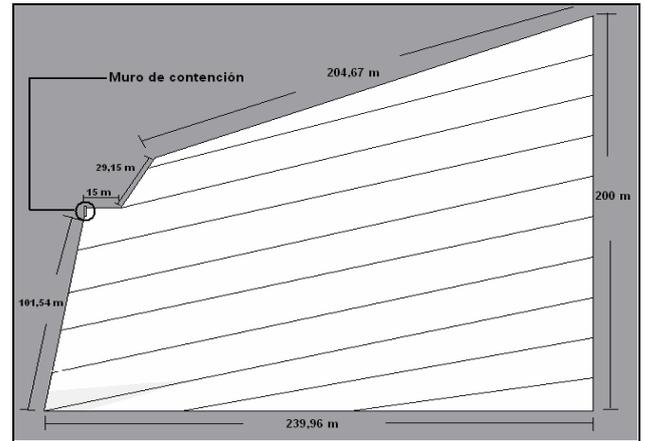


Fig. 6. Geometría para el modelo 3.

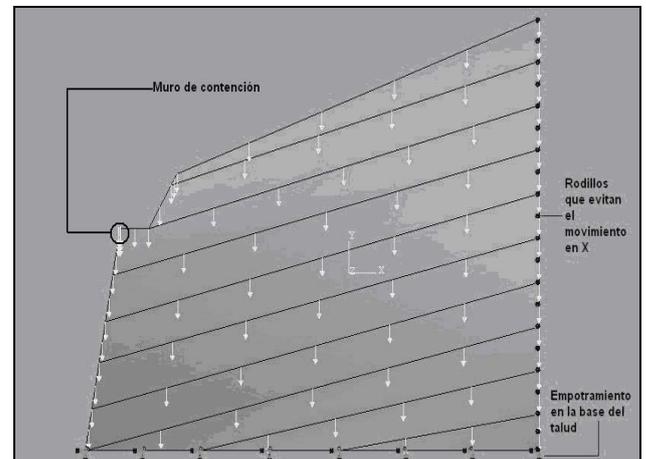


Fig. 7. Condiciones de borde y cargas aplicadas al modelo 3.

Tabla 3. Parámetros geomecánicos asignados al modelo 3

Material	E (Pa)	ν	ρ (kg/m ³)
A	3,4251 E+09	0,050	2906
B	6,42509 E+09	0,052	2800

ción de Morón y construido por PEQUIVEN (Fig. 8). Es un modelo que representa un corte transversal de una presa. Se consideraron 6 materiales diferentes para este modelo. El primero corresponde a la fundación de la presa, constituidas por rocas metaígneas. Suprayacente a estas se encuentra un segundo material constituido por arenas de medias a finas; posteriormente hay una gradación progresiva de arena a arcillas, éstas últimas constituyen el núcleo de la presa, el cual está bordeado por un enrocado que la cubre. La parte inferior de la presa fue empotrada restringiendo así los movimientos en todas las direcciones para la base del modelo, se colocaron rodillos en los laterales del dique, permitiéndose solamente movimientos verticales para poder

simular los desplazamientos que ocurren debido al efecto de la gravedad sobre la presa; se aplicó además una carga hidráulica en la pared de la presa que está en contacto con el agua, y que está siendo rebosada (Fig. 9).

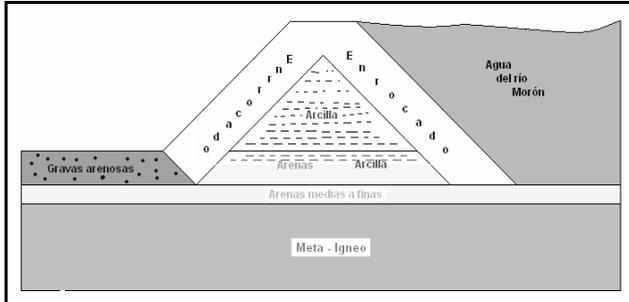


Fig. 8. Geometría para el modelo 4.

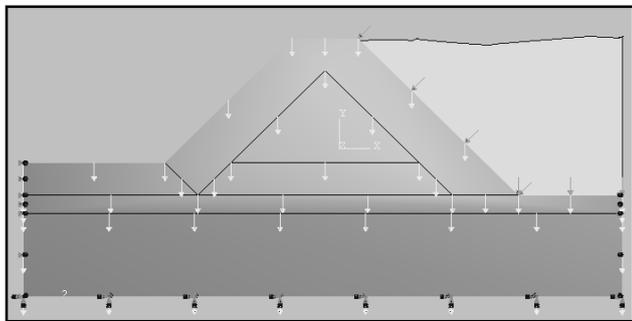


Fig. 9. Condiciones de borde y cargas aplicadas al modelo 4.

Tabla 4. Parámetros geomecánicos asignados al modelo 4

Materiales	E (Pa)	ν	ρ (kg/m ³)
Metaígneo	2,500E+09	0.2	2900
Arena media a fina	2,26E+07	0.30	2750
Arena y arcilla	3,43E+07	0.25	2800
Arcilla	4,89E+07	0.30	2900
Enrocado	3,54E+07	0.20	2000
Gravas arenosas	1,30E+08	0.30	2750

7 Resultados

Los resultados otorgados por el programa son representados en una escala de degradación de colores, donde el color rojo y el azul representan los valores de los extremos de la degradación cromática, es decir, las magnitudes mayores y menores de las variables solicitadas. El sistema de referencia para los modelos está orientado por los ejes (x) y (y), por ser todos los modelos bidimensionales. Se utilizaron elementos del tipo CPS4R para todos los modelos, lo que significa que son elementos sólidos (C), de esfuerzos planos (PS), con cuatro nodos (4) y de integración reducida (R).

Para el modelo 1 se realizaron seis mallados diferentes con la finalidad de obtener un número de elementos en el cual los resultados fuesen coherentes, es decir, se fue aumentando progresivamente los elementos constituyentes de la malla, hasta que los valores de deformación en el macizo se mantuvieran; este procedimiento representa la calibración del modelo, en este modelo, se determinó que mallas con un número de elementos que varía entre 1271 hasta 6929, muestran resultados coherentes, obteniéndose el siguiente gráfico de calibración (Fig. 10):

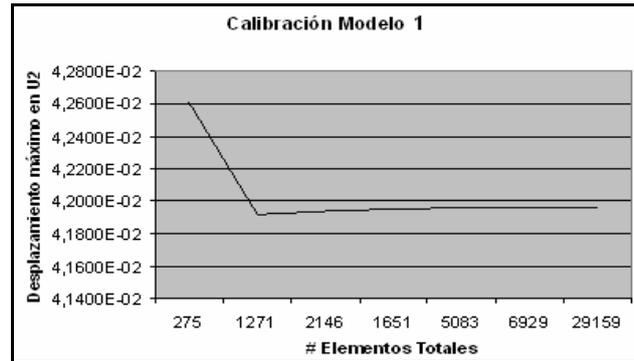


Fig. 10. Gráfico de calibración del modelo 1.

La Fig. 10 muestra que los valores de desplazamiento máximo se estabilizan entre los 2000 a 6000 elementos, para el modelo 1 se empleó una malla con 3518 elementos.

Con relación a las variables de salida solicitadas al programa (desplazamientos, deformaciones y esfuerzos) se puede decir que las deformaciones máximas principales se dan a lo largo de los planos de esquistosidad sometidos a mayores presiones litostáticas, es decir, los que se encuentran más cercanos a la base del talud. Mientras que los esfuerzos máximos principales alcanzaron los 145300 Pa, distribuyéndose estos prácticamente de manera puntual sobre algunos planos de esquistosidad del macizo rocoso. Igualmente, las mayores presiones se obtuvieron en la base del macizo y el esfuerzo cortante máximo se concentró en el tope del talud, en la base de la carretera y hacia toda la zona del macizo rocoso y hacia el lado izquierdo del modelo; esta información permitió elaborar un corte longitudinal para estimar aproximadamente el volumen de masa (suelo y/o roca) que puede desprenderse en esta colina, resultando igual a 1021,649 m²/u.

Para el modelo 2 de igual modo que para el modelo 1, se realizaron varios mallados hasta determinar un número de elementos en el cual los resultados convergieran, finalmente se trabajó con un modelo de 1339 elementos, procurando que éste fuese lo más uniforme posible y evitando la formación de nudos que pudiesen alterar los resultados. Las deformaciones máximas principales se dan hacia el centro del macizo rocoso, y afectan directamente a los planos de foliación, pudiendo contribuir a futuras superficies de rotura. Los esfuerzos máximos principales alcanzan los 128900

Pa, distribuyéndose esto prácticamente de manera puntual en el centro del macizo rocoso. Igualmente, las mayores presiones se obtuvieron en la base del macizo y en su parte central, el esfuerzo cortante máximo se concentró en la base de la carretera. Determinándose así una posible superficie de rotura que implicaría que existen alrededor de 223,935 m²/u de masa que pueden desprenderse.

Para el modelo 3 se utilizó un mallado de 4479 elementos. La deformación máxima principal se localiza en la parte inferior del macizo, debido a que allí se concentran las mayores presiones litostáticas. En este caso se determinó a través de las presiones máximas y del esfuerzo cortante dos superficies de rotura que reflejan movimientos de masa de aproximadamente 565.645 m²/u. Siendo máximos los desplazamientos en la parte superior del macizo rocoso, alcanzando valores de casi 10 cm.

Para el modelo 4 se realizaron diferentes mallados hasta obtener una calibración adecuada y se determinó que el mallado más conveniente debía ser lo suficientemente denso como para reflejar al detalle todas las deformaciones existentes, para lo cual se utilizó una malla con 5098 elementos, tal y como se observa en la Fig. 11:

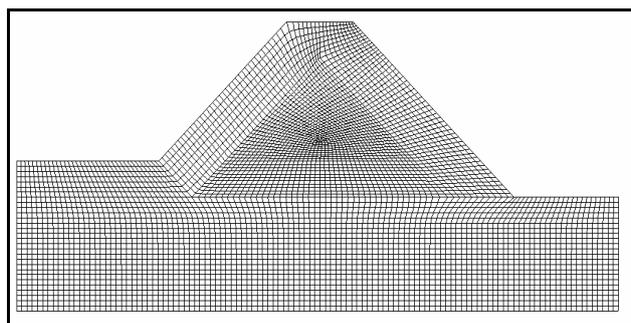


Fig. 11. Mallado no deformado para el modelo 4 con un número total de 5098 elementos.

Las deformaciones máximas principales se concentran en la base de la presa sometida a la carga hidráulica, con un valor de 0.01384, el cual sobrepasa el límite de plasticidad, indicando que la deformación inicialmente elástica alcanza cierto grado de plasticidad. Los esfuerzos máximos principales son de 220000 Pa, actuando estos prácticamente de manera puntual sobre el vértice del fondo de la presa en la zona sometida a la carga hidráulica máxima. Por otra parte, el esfuerzo cortante máximo es de 264300 Pa y también se concentra en el vértice del fondo de la presa, siendo esta área, por tanto, la que sufre los mayores esfuerzos de toda la estructura.

8 Conclusiones

Los modelos elásticos presentados para el estudio de amenaza geológica asociada a movimientos de masa son una aproximación de la realidad. Estas aproximaciones permiten establecer similitudes con el contexto en el que se

Tabla 5 – Resultados de la simulación modelos 1,2,3,4.

Modelo	Esfuerzo máx. principal (Pa)	Deformación máx.	Desplazamientos en eje "Y" (mts.)
1	1.453E05	3.865E-05	-4.333E-02
2	1.289E05	5.077E-05	-1.163E-02
3	1.733E05	6.982E-05	-9.919E02
4	2.200E05	1.384E-02	-4.443E-1

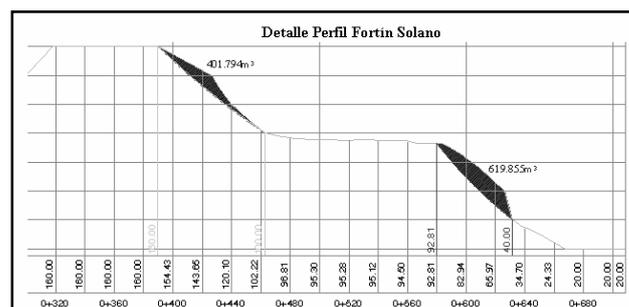


Fig. 12. Corte longitudinal del macizo rocoso del Fortín Solano, modelo 1.

desenvuelven estos eventos, mediante la utilización de condiciones de borde adecuadas que garantizan la continuidad del medio simulado.

La determinación de las presiones y principalmente del esfuerzo cortante sirve para determinar los lugares donde es más probable que se produzcan superficies de rotura que conlleven al colapso de los taludes simulados.

Los modelos 1, 2 y 3 presentan deformaciones inferiores a 0,003 que es considerado el límite promedio en el cual comienza la plasticidad en las rocas, indicando así que las deformaciones ocurridas en estos modelos se encuentran netamente en el régimen elástico.

En el modelo 4 la deformación máxima principal es de 0,01384 superando el límite establecido donde comienza el régimen plástico que en la mayoría de las rocas es de 0.003, por lo que se puede concluir que los materiales que conforman la estructura están siendo sometidos a una deformación plástica. Esta deformación se da en el fondo del embalse, justo en el vértice del enrocado donde la carga hidráulica es máxima; en este lugar se dan también las deformaciones máximas en las direcciones Ox y Oy, y en el plano (xy).

Para el modelo 1 los mayores desplazamientos ocurren en el eje (y), lo cual evidencia la acción de la carga por gravedad asignada; localizándose principalmente hacia el tope de la colina con un valor de -4,333cm. Igualmente, se elaboró un corte longitudinal, para estimar aproximadamente el volumen de masa (suelo y/o roca) que puede desprenderse en esta colina. Éste resultó igual a 1021,649 m²/u., lo cual representa un valor bastante significativo y hace pensar en lo importante que resulta desarrollar un proyecto de estabilización de los taludes en esta colina.

En el modelo 2 las mayores deformaciones se dan en el núcleo del afloramiento y justamente caen sobre la superficie de uno de sus planos de foliación, con valores de $5,077E-05$. El plano horizontal muestra mayores deformaciones que el plano vertical y éstas se encuentran localizadas en el contacto entre la calzada de la vía y el pie del talud. Los esfuerzos máximos principales están localizados en la zona de mayor deformación, es decir, hacia el centro del macizo rocoso. El esfuerzo cortante máximo afecta la parte superior del talud, la calzada y el extremo izquierdo del mismo; no obstante, considerando los planos de foliación y la pendiente del afloramiento es factible que se originen movimientos de masa especialmente hacia el tope del mismo. Los desplazamientos verticales se producen hacia el tope del talud y coinciden con la región en la cual actúan los esfuerzos máximos. Los desplazamiento en el eje (y) tiene un valor de -1.163 cm y están acompañados por desplazamientos horizontales. Por consiguiente el movimiento se produce en ambas direcciones.

Para el modelo 3 se requería un mallado lo suficientemente denso ya que este modelo representa un área relativamente grande y era necesario poder tener resultados muy detallados y precisos en todo el modelo. La deformación máxima principal se localiza en la parte inferior del macizo rocoso coincidiendo con el área donde se concentran las mayores presiones litostáticas. Mientras que el desplazamiento neto máximo es de aproximadamente 10 cm, localizándose hacia el tope de la colina, lo cual indica que podrían producirse grandes movimientos de masa en esa zona.

En el modelo 4 los desplazamientos máximos alcanzan dimensiones significativas, alrededor de 46cm en la parte superior de la presa, donde se localiza el cuerpo de agua, esta estructura se encuentra expuesta a esfuerzos tan grandes que la deformación máxima supera el límite elástico, por lo que se considera que la estructura está siendo sometida a una deformación plástica, lo cual es desfavorable para la estabilidad del dique.

Cabe destacar entonces que algunas estructuras civiles

localizadas en el área de estudio están expuestas a presiones superiores para las que fueron diseñadas inicialmente, tal es el caso de:

El dique sobre el río Morón (modelo 4) y el muro de contención construido en la Local 004 progresiva 2000 + 700 de la vía Urama – Canoabo, en el sector Los Róbalos, ésta última representa una solución muy limitada si se trata de controlar todo el material que constituye el macizo rocoso que intenta estabilizar.

Las regiones y zonas que fueron simuladas y presentaron deformaciones y consecuentemente desplazamientos coinciden con las zonas que se habían identificado previamente durante la etapa de campo y las cuales se habían catalogado como áreas susceptibles a sufrir movimientos de masa, por lo que a través de la simulación se confirma que dichas áreas pueden experimentar en cualquier momento, este tipo de fenómeno más aún si se considera que sobre dichos taludes actúan otros agentes como presiones hidrostáticas y movimientos ocasionados por ondas sísmicas. Este hecho permite mencionar una vez más, la importancia que tienen las herramientas computacionales así como los métodos numéricos para analizar y prever el comportamiento de un determinado medio, ante la ocurrencia de un fenómeno particular; en esta investigación se pudo conocer el posible comportamiento de determinadas estructuras tanto geológicas como civiles mediante la utilización del software ABAQUS, el cual emplea el método de elementos finitos

Referencias

- ABAQUS, 2002. ABAQUS/Keywords manual, Version 6.3, Pawtucket (RI), Hibbitt, Klarlsson & Sorensen, Inc.
- Chandrupatla T. y Belegundu, AD, 1999, Introduction to finite elements in Engineering (2da ed.). Prentice-Hall, Englewo.
- Google Earth, 2006, Imágenes satelitales de Carabobo, Extraído el 20 de septiembre de 2006.