

Análisis numérico de las discontinuidades del macizo rocoso de la autopista Rafael Caldera en Venezuela

Numerical analysis of the rock massif's discontinuities of the highway Rafael Caldera in Venezuela

Elberg, María; Vivas, Janisse; Fernández, Vanessa; Sosa, Grelys y González, Leonardo

Dpto. de Geomecánica. Grupo de Investigación en Geología Aplicada, GIGA

Escuela de Ingeniería Geológica. Facultad de Ingeniería. ULA

Mérida, 5101, Venezuela.

mariael@ula.ve

Resumen

La investigación que se presenta tiene como objetivo principal analizar el modelado numérico de las discontinuidades en el macizo rocoso ubicado en la autopista Rafael Caldera en el Estado Mérida, al Occidente de Venezuela. La metodología aplicada se basa en reconocimiento de campo y análisis de muestras en laboratorio para obtener los parámetros geomecánicos a ser utilizados en la simulación, utilizando el Método de Elementos Finitos a través del programa comercial ABAQUS™. Se realizan modelos elásticos en dos y tres dimensiones con geometrías y características físico-naturales obtenidas durante el trabajo de campo. Los resultados muestran valores de módulo de elasticidad y de relación de Poisson acorde con los datos bibliográficos para el tipo de roca presente en la zona. Se obtienen las distribuciones de esfuerzos y deformaciones en la zona de estudio determinando las características geológico-estructurales del área junto con las clasificaciones geomecánicas estimando el comportamiento de las discontinuidades, así como posibles comportamientos anómalos y eventuales colapsos. Las conclusiones principales permiten describir el macizo rocoso de buena calidad confirmado con los resultados de los ensayos de compresión simple. También son analizadas zonas susceptibles a plasticidad con valores cercanos a los límites no permitidos, condicionando el sector a respuestas provocadas por estados de sobrecarga no controlados. La zona en estudio corresponde a taludes ubicados en una de las principales arterias viales de Venezuela, y el impacto económico-ambiental en caso de colapso es importante y por ende este sector debe ser altamente controlado.

Palabras clave: Simulación geomecánica, método de elementos finitos, modelos geonumericos.

Abstract

The main objective of this work is to analyze the geological numerical modeling of the discontinuities in the rock massif located in the Rafael Caldera highway, which is in the state of Mérida at the west side of Venezuela. The methodology used in this paper is based on the field reconnaissance and analysis of rock samples at the laboratory to obtain the geo-mechanical parameters to be used in the simulation, utilizing the Finite Elements Method through the commercial software known as ABAQUS™. Elastic models are made in two and three dimensions with geometrics and physical-natural features obtained during the fieldwork. The results show values of Elasticity Modulus and of Poisson relation according to the values found on the bibliography, for the type of rock present in the zone. The stress and strain distribution are obtained in the zone of study, determining the geological-structural features present in the area along with the main geo-mechanical classifications, estimating the behavior of the discontinuities, as well as possible anomalous behaviors and possible collapses. The main conclusions allow describing the rock massif in a good quality, confirming the results of the simple compression tests. Also, susceptible zones to plasticity with close values to the non-allowed limits are analyzed, conditioning the sector to responses produced by states of non-controlled overcharge. The zone in study corresponds to slopes located in one of the main vial arteries of Venezuela, and the economic-environmental impact in case of a collapse is relevant, therefore, this sector must be highly controlled.

Key words: Geo-mechanic Simulation, Finite Element Method, Geonumerical Models.

1 Introducción

En esta investigación se utiliza la simulación numérica basada en la aplicación del método de elementos finitos para analizar las discontinuidades del macizo rocoso ubicado en las cercanías del Túnel Santa Teresa de la Autopista Rafael Caldera, del estado Mérida, Venezuela, a través de modelos bidimensionales y tridimensionales que permiten cuantificar esfuerzos, desplazamientos y deformaciones para establecer el comportamiento geomecánico del macizo rocoso, cuya actividad geológica afecta de manera directa a la circulación vehicular de la vía en estudio la cual representa una de las principales vías de comunicación terrestre de la ciudad de Mérida con el resto del país.

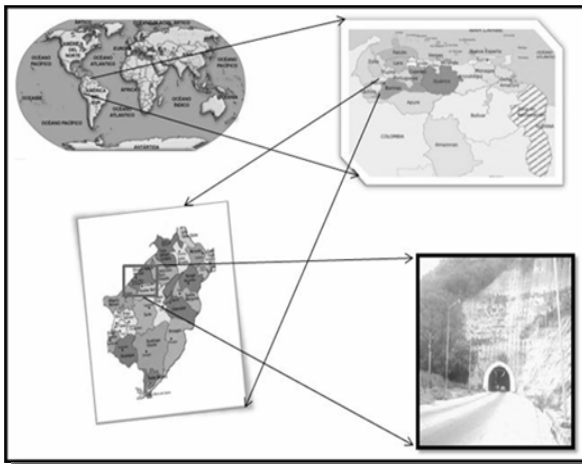


Fig. 1. Ubicación del área de estudio

Las discontinuidades son fracturas en la roca las cuales son un factor que afecta notablemente el comportamiento de un macizo rocoso, por esto resulta importante su estudio para lograr aminorar los costos de índole social y económico en caso de derrumbe y obstrucción de la vía.



Fig. 2. Diaclasas en estudio del Granito de El Verdalito

Con el presente trabajo se realiza un análisis numérico utilizando la simulación geomecánica, a partir de los datos

obtenidos en ensayos de laboratorio y los suministrados por la caracterización y análisis de las discontinuidades involucradas en el Túnel Santa Teresa. La simulación se lleva a cabo mediante la aplicación del método de elementos finitos a través del programa comercial ABAQUS™, para analizar la influencia de las discontinuidades presentes en la distribución de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en la estabilidad de la zona.

2 Metodología

2.1 Estudios preliminares

En esta etapa se realiza la recopilación e interpretación de la información bibliográfica, cartográfica, fotogeológica y la obtención de los datos en formato digital. Se emplean fotografías aéreas a escala 1:10.000, correspondientes al vuelo 010255, donde las fotografías analizadas corresponden a las enumeradas como 381 a la 386; con la finalidad de identificar patrones estructurales, tipos de drenaje presentes, litología, principales zonas, entre otros rasgos.

2.2 Etapa de campo

Durante el desarrollo de esta etapa se realiza el reconocimiento del área de estudio en conjunto con la información bibliográfica obtenida en la fase preliminar, además se divide en dos sectores la zona conformada por material granítico perteneciente al Granito de El Verdalito del estado Mérida, determinando las características correspondientes a cada una de las familias de discontinuidades encontradas en la zona, esto es, la identificación de la litología presente, rumbos y buzamientos, entre otras, con la finalidad de utilizar estos datos durante la etapa de modelado y simulación.

2.3 Etapa de laboratorio

Durante esta etapa se realizan ensayos de compresión uniaxial a muestras de roca granítica recolectadas en la zona, de igual manera se determinan los parámetros geomecánicos y se comprueba la litología existente. Todos los ensayos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad de Los Andes.

2.4 Etapa de modelado

En esta fase de la investigación se diseñan los modelos, lo cual lleva la creación de partes, particiones, secciones, creación de materiales y la adaptación del mallado. Se aplican las cargas y condiciones de borde, los cuales constituyen los apoyos externos de la estructura y que dependen del análisis que se realice y las características del modelo.

En problemas bidimensionales los posibles movimientos pueden darse a lo largo de los ejes X o Y, como despla-

zamientos, o alrededor del eje Z como un giro. Fundamentalmente existen tres tipos de apoyos: rodillo, apoyo fijo y empotramiento, siendo empleados para los modelos diseñados empotramientos y rodillos; los empotramientos permiten garantizar la continuidad lateral y vertical del medio geológico, mientras que, el uso de rodillos permite la actuación libre de cargas aplicadas en la dirección vertical.

Modelo 1

Este modelo es una representación bidimensional de la familia de discontinuidades que afecta en mayor grado al macizo rocoso denominado Sector 1, ubicado en las cercanías del Túnel Santa Teresa, Autopista Rafael Caldera del Estado Mérida bajo las coordenadas UTM N 938387; E 216965.

Para la realización de este modelo se define un material, el cual es asignado a todas las particiones presentes realizadas para definir las geometrías del modelo. Corresponde a granito, roca ígnea, cuyas propiedades son asignadas de acuerdo a los datos obtenidos en ensayos de laboratorio y en el Sistema Internacional de medidas (SI).

Este modelo emplea empotramientos hacia la base del mismo con la finalidad de impedir cualquier tipo de movimiento hacia la base del macizo rocoso, mientras que se emplean rodillos hacia los laterales del modelo, permitiéndose desplazamientos en la dirección vertical.

Las cargas asignadas corresponden a las cargas por presión litostática y las cargas asociadas a la acción de la gravedad sobre el macizo rocoso en consideración.

La figura 3 muestra la geometría del Modelo 1 con sus respectivas dimensiones. Se muestran los valores de la carga litostática y la ubicación de las diaclasas.

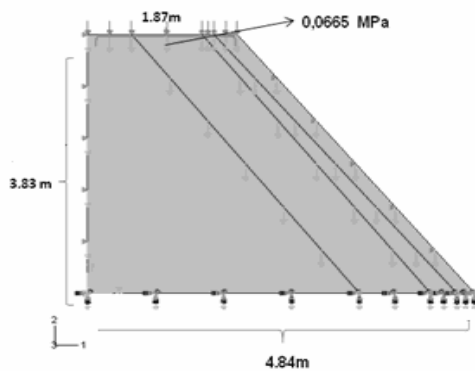


Fig. 3. Geometría, condiciones de borde y cargas aplicadas al Modelo 1

Modelo 2

El Modelo 2 representa un modelo tridimensional en donde se pueden observar la totalidad de las discontinuidades presentes para el Sector 1.

Este modelo al igual que el anterior está conformado por roca granítica.

Las cargas aplicadas corresponden a dos tipos, la impuesta por la gravedad y la aplicada por carga litostática suprayacente, obtenida mediante calibrado del modelo.

Las condiciones de borde corresponden a restricción de cualquier tipo de movimiento hacia la base del modelo, en donde el basamento se mantiene fijo y por tanto empotrado. Se asignan rodillos hacia los laterales del modelo, garantizando la continuidad vertical del medio, en donde sólo se permite el libre movimiento en la dirección vertical.

Las figuras 4 y 5 muestran el Modelo 2. La primera detalla la geometría indicando las familias de diaclasas y la segunda detalla las condiciones de borde y las cargas.

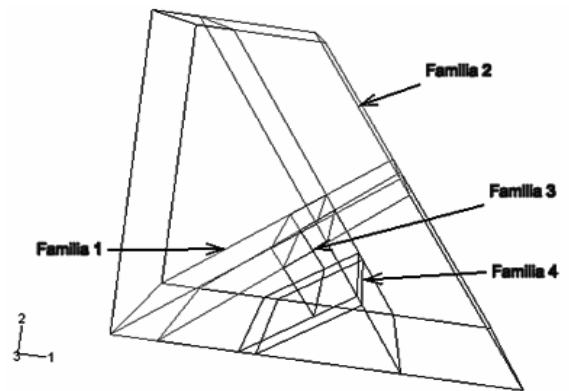


Fig. 4 Geometría de Modelo 2 y familias de discontinuidades en el sector 1

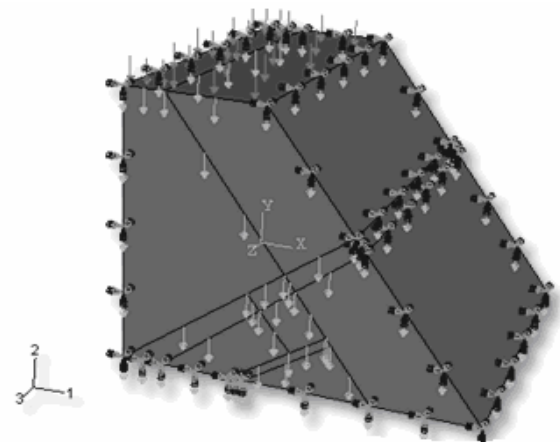


Fig. 5. Condiciones de borde y cargas aplicadas al Modelo 2

Modelo 3

Corresponde a un modelo bidimensional realizado para representar la distribución de la familia de discontinuidades que presenta mayor afección para el Sector 2.

Las condiciones de borde tomadas son empotramiento hacia la base del modelo para garantizar que éste no presente movimiento en ninguna dirección, mientras que hacia los

laterales se consideran rodillos que permiten el movimiento vertical producto de la carga litostática aplicada en conjunto con la carga que se asigna por efectos de gravedad.

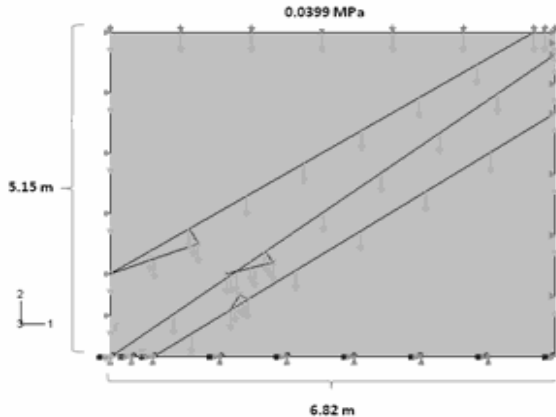


Fig. 6 Geometría, condiciones de borde y cargas aplicadas al Modelo 3

Modelo 4

Se trata de un modelo tridimensional en donde se observan todas las familias de discontinuidades presentes para el Sector 2. El material al igual que los modelos anteriores corresponde a roca granítica; las condiciones de borde que se consideran para este modelo son rodillos hacia los laterales del modelo y empotramientos hacia la zona basal. Las cargas presentes al igual que en los casos anteriores corresponden a cargas calibradas de origen litostático y por influencia de la gravedad.

Las figuras 7 y 8 muestran la geometría del Modelo 4, las familias de discontinuidades, cargas y condiciones de apoyo.

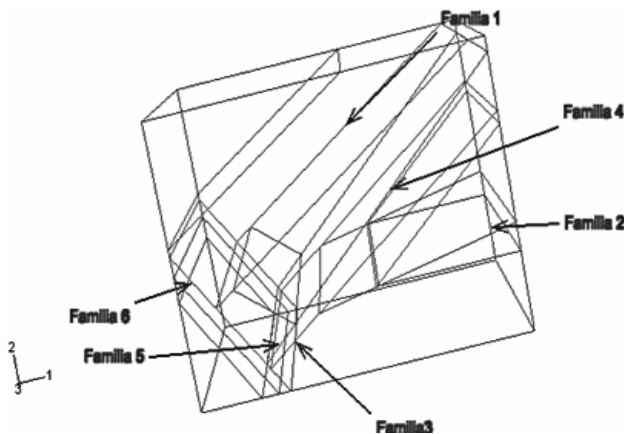


Fig. 7 Geometría de familias de discontinuidades -Sector 2

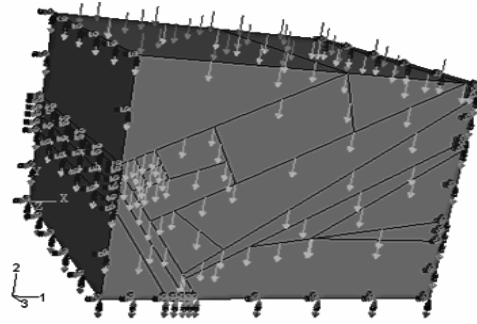


Fig. 8 Condiciones de borde y cargas aplicadas al modelo 4

Los parámetros geomecánicos utilizado para la simulación en todos los modelos, obtenidos en campo y laboratorio se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros geomecánicos empleados para la elaboración de los modelos

| Materia | E (Pa) | μ | γ (Kg/m ³) |
|---------|----------|-------|-------------------------------|
| Granito | 2.58E+10 | 0.30 | 2700 |

4 Resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación corresponden a valores de esfuerzos, desplazamientos y deformaciones obtenidos para el macizo rocoso compuesto de granito.

El Modelo 1 muestra desplazamientos en la dirección del eje Y, donde presentan sus mayores magnitudes concentradas hacia el tope del modelo con valores de 0.15 mm. Las deformaciones máximas representadas se dan a lo largo de la orientación del eje Y, repartidas de una forma homogénea, siendo las deformaciones en el plano XY las más importantes numéricamente para este modelo. Los esfuerzos máximos representados se hallan también sobre la dirección del eje Y, con valores que alcanzan los 138800 Pa, distribuyéndose éstos hacia la base del modelo.

El Modelo 2 presenta deformaciones máximas hacia la base de los modelos, en los planos que definen a las familias de discontinuidades 1 y 4. Los esfuerzos máximos representados se originan sobre la zona basal del modelo con valores que alcanzan los 163400 Pa, tanto los esfuerzos como las deformaciones para este modelo se representan máximos en la orientación vertical.

Para el Modelo 3 las máximas deformaciones presentes se dan en la orientación del eje Y, donde estos valores aumentan progresivamente de tope a base. Los máximos esfuerzos se generan hacia la base del modelo con valores de hasta 1403000 Pa, por su parte el esfuerzo cortante, es decir el esfuerzo que se genera para el plano

XY, muestra un comportamiento propio de un régimen compresivo.

El Modelo 4 muestra sus máximos desplazamientos en la vertical aumentando gradualmente hacia el tope, donde su máximo valor es de 0.20 mm producto del flujo de la fuerza de gravedad en conjunto con la carga litostática aplicada al modelo. Las deformaciones máximas se encuentran hacia la zona basal, donde las mayores deformaciones observadas corresponden a 7.518E-06, donde se ubican las familias de discontinuidades enumeradas como 3 y 4 para este modelo. Por su parte, los esfuerzos más importantes también se sitúan sobre las mismas familias de discontinuidades, es decir las enumeradas como 3, 4 y 5, siendo esta área la que sufre mayores esfuerzos en el macizo para este sector con valores que alcanzan los 7103 Pa.

Las tablas siguientes muestran los valores obtenidos para desplazamientos (U, en metros), esfuerzos (S, en Pa) y deformaciones unitarias (E, adimensionales) en las direcciones de los ejes X (1), Y (2) y del plano XY (12), de los Sectores 1 y 2 del macizo rocoso analizado.

Tabla 2. Resultados de la simulación de los modelos para las familias de discontinuidades del Sector 1, en el tope de los modelos

| Parámetro | Fam. 1 | Fam. 2 | Fam. 3 | Fam. 4 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| U1 (m) | -7,90E-04 | -2,09E-03 | -6,47E-04 | -6,47E-04 |
| U2 (m) | 1,43E-02 | -1,48E-02 | -6,71E-03 | -6,71E-03 |
| E1 | 4,41E-03 | -1,08E-03 | -3,69E-04 | -3,73E-04 |
| E2 | -2,48E-03 | -2,85E-03 | -7,78E-04 | 7,74E-04 |
| E12 | 3,89E-03 | -1,78E-03 | 5,02E-04 | 3,76E-04 |
| S1 (Pa) | 9,64E+07 | -4,80E+07 | -8,07E+03 | -7,90E+03 |
| S2 (Pa) | -4,95E+07 | -9,91E+07 | -2,39E+07 | -1,61E+04 |
| S12 (Pa) | 3,86E+07 | 1,76E+07 | 3,73E+06 | 3,74E+06 |

Tabla 3. Resultados de la simulación de los modelos para las familias de discontinuidades del Sector 1, en la base de los modelos

| Parámetro | Fam. 1 | Fam. 2 | Fam. 3 | Fam. 4 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| U1 (m) | 1,23E-04 | 7,27E-04 | 7,88E-04 | 4,30E-04 |
| U2 (m) | 0 | -3,71E-03 | -1,12E-03 | -2,24E-03 |
| E1 | -1,12E-03 | 2,29E-04 | -1,49E-04 | 2,06E-04 |
| E2 | -4,87E-03 | 4,91E-03 | -3,29E-03 | -3,30E-03 |
| E12 | 9,73E-04 | -2,37E-03 | 1,51E-03 | 1,51E-03 |
| S1 (Pa) | -4,04E+04 | -4,16E+04 | -2,71E+04 | -2,72E+04 |
| S2 (Pa) | -1,37E+05 | -1,38E+05 | -9,30E+04 | -9,32E+04 |
| S12 (Pa) | 9,66E+06 | 2,35E+07 | 1,49E+07 | 1,49E+07 |

Tabla 4.- Resultados de la Simulación de los Modelos para las familias de

discontinuidades del Sector 2, en el tope de los modelos

| Parámetro | Fam. 1 | Fam. 2 | Fam. 3 | Fam. 4 | Fam. 5 | Fam. 6 |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| U1 (m) | 5.682 E-06 | 5.675 E-06 | -1.87 E-09 | 3.570 E-09 | -6.45 E-10 | -6.47 E-10 |
| U2 (m) | -2.15 E-05 | -2.15 E-05 | -1.96 E-05 | -1.31 E-04 | -1.96 E-05 | -1.96 E-05 |
| E1 | 8.167 E-07 | 6.971 E-07 | -1.37 E-09 | -2.14 E-08 | 6.638 E-09 | 8.071 E-10 |
| E2 | -2.64 E-07 | -2.63 E-07 | -3.30 E-09 | -9.25 E-09 | -2.46 E-09 | 2.891 E-10 |
| E12 | -3.07 E-06 | -2.36 E-06 | -2.61 E-06 | -9.60 E-06 | -2.22 E-06 | -2.25 E-06 |
| S1 (Pa) | 1.056 E+04 | 1.027 E+04 | -2.22 E+04 | -8.17 E+04 | -1.89 E+04 | -2.25 E+04 |
| S2 (Pa) | -2.62 E+03 | -2.61 E+03 | -3.28 E+01 | -1.81 E+02 | -5.99 E+01 | 2.869 E+02 |
| S12 (Pa) | -7.98 E+04 | -8.26 E+04 | -6.26 E+04 | -2.72 E+05 | -6.31 E+04 | -6.37 E+04 |

Tabla 5. Resultados de la simulación de los modelos para las familias de discontinuidades del Sector 2, en la base de los modelos

| Parámetros | Fam.1 | Fam. 2 | Fam. 3 | Fam. 4 | Fam. 5 | Fam. 6 |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| U1 (m) | 1.894 E-06 | 1.419 E-06 | -2.08 E-09 | 1.284 E-08 | -2.27 E-09 | -1.95 E-10 |
| U2 (m) | -7.19 E-06 | -7.18 E-06 | -4.92 E-06 | -4.38 E-05 | -6.56 E-06 | -4.92 E-06 |
| E1 | 2.441 E-06 | 2.756 E-06 | 3.525 E-09 | -6.09 E-08 | 2.301 E-08 | 8.071 E-06 |
| E12 | 5.089 E-06 | 5.61 E-06 | -1.45 E-08 | 1.839 E-07 | -2.37 E-08 | 2.891 E-10 |
| E2 | -1.04 E-05 | -1.08 E-05 | -6.21 E-06 | -4.94 E-05 | -6.22 E-06 | -6.60 E-06 |
| S1 | -5.09 E+04 | -5.39 E+04 | -5.28 E+04 | -6.20 E+05 | -5.29 E+04 | -5.27 E+04 |
| S12 | 5.050 E+04 | 5.568 E+04 | -1.44 E+02 | -1.46 E+03 | -2.35 E+02 | 2.869 E+02 |
| S2 | -2.77 E+05 | -2.90 E+05 | -1.76 E+05 | -1.40 E+06 | -1.77 E+05 | -1.75 E+05 |

5 Conclusiones

Todos los modelos presentan deformaciones de tipo elástico, sin incursionar en rangos plásticos. Estos modelos constituyen una aproximación de la realidad, en donde las medidas y parámetros empleados fueron obtenidos en campo y en el laboratorio, lo que permite establecer similitudes con el contexto en el que se encuentran ubicadas las discontinuidades.

Para todos los modelos establecidos los mayores desplazamientos ocurren en la dirección vertical, lo cual evidencia la acción de la carga litostática suprayacentes y la carga por gravedad asignadas a cada modelo.

En el Modelo 2 las mayores deformaciones se muestran máximas en la dirección del eje Y hacia los planos que definen las discontinuidades pertenecientes a la Familia 2. Los esfuerzos al igual que las deformaciones, afectan mayoritariamente a los planos que definen la Familia de discontinuidades 2 y hacia la zona que define la familia de discontinuidades 4, como resultado de su complicada

geometría.

Para el Modelo 3, los esfuerzos presentan un comportamiento análogo a las deformaciones, por cuanto los valores máximos actúan sobre la misma zona, es decir hacia la base de los modelos. En cuanto a los desplazamientos para este modelo, éstos son máximos en la orientación del eje Y, aumentando progresivamente de base a tope, producto del influjo de la carga por gravedad y la carga litostática aplicada.

En el Modelo 4 los desplazamientos máximos representados se posan sobre la dirección vertical, hacia el tope del modelo, mientras que las deformaciones máximas presentan un comportamiento similar al de los esfuerzos máximos, aplicando su mayor valor sobre las discontinuidades enumeradas como 3, 4 y 5 para este sector, donde las máximas magnitudes se dan en el plano XY.

Por lo tanto luego de realizar el análisis numérico, resulta importante destacar que las discontinuidades presentes en el macizo rocoso ubicado en la Autopista Rafael Caldera del Estado Mérida en Venezuela, a pesar de presentarse en gran número, no muestran riesgos geológicos de importancia, señalando que el macizo rocoso es de buena calidad.

Sin embargo, el sector es afectado por constantes derrumbes producto de deslizamientos de material blando y otro tipo de rocas de menor calidad que la analizada.

El granito estudiado y las diaclasas presentes en el presentan un buen comportamiento geomecánico a las solicita-

ciones hechas en el análisis numérico realizado.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico, CDCHT de la Universidad de Los Andes por el apoyo financiero dado a este trabajo.

Referencias

- Elberg M y Febres H, 2004, Proceso automatizado de refinamiento H-adaptativo usando índices de energía de deformación. *Ciencia e Ingeniería*, Vol. 25, No.3, pp. 143-148.
- González L y Ferrer M, 2002, *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, S. A, Madrid, España.
- Sosa G, Alam M y Elberg M, 2008, Aplicación del método de elementos finitos en la simulación de zonas susceptibles a movimientos de masa en la franja costera del Estado Carabobo, Venezuela. *Ciencia e Ingeniería*, Vol. 29, N° 2, pp. 199-206.
- Liu G, 2002, *Mesh Free Methods: Moving Beyond the Finite Element Method*. CRC Press, Boca Raton.

Recibido: 21 de enero de 2010

Revisado: 28 de junio de 2010