

ARK: <https://n2t.net/ark:/87558/tekhne.26.3.5>

## Análisis de estabilidad de taludes de secciones típicas en la construcción de carreteras a través de modelos numérico

*Johannes Briceño<sup>1</sup>, María Guillén<sup>1</sup>, Norly Belandria<sup>1</sup>, Francisco León<sup>1</sup>*

[johannes@ula.ve](mailto:johannes@ula.ve)<sup>1</sup>, [mariadanielagh13@gmail.com](mailto:mariadanielagh13@gmail.com)<sup>1</sup>, [norlyb@gmail.com](mailto:norlyb@gmail.com)<sup>1</sup>, [fleon@ula.ve](mailto:fleon@ula.ve)<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-1265-8788><sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-9485-0860><sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-9485-0860><sup>1</sup>

Universidad de los Andes<sup>1</sup>, Mérida, Venezuela

### Resumen

Uno de los aspectos más importantes de diseño es la geometría que debe adoptar una sección transversal de vía tras el movimiento de tierras necesario para la construcción de una carretera. Por tanto, la estabilidad de taludes se ha convertido en el elemento clave a controlar. La presente investigación se centra en definir criterios de seguridad en cuanto a la altura e inclinación que debe presentar un talud de una sección transversal de carretera, en presencia de cuatro tipos de materiales escogidos, lutita fracturada, arena limosa, arcilla firme y arcilla expansiva; para conservar factores de seguridad que garanticen estabilidad en las secciones transversales típicas de vía como ladera, trinchera, terraplén y a media ladera. El estudio parte evaluando recomendaciones geométricas, realizando el análisis por el Método de Equilibrio Límite y por modelos numéricos utilizando el Método de Elementos Finitos, apoyado con el uso de programas de aplicación en geotecnia. Luego se realizó un cuadro comparativo con los factores de seguridad obtenidos. Se presentó para algunos de los casos de análisis nuevas dimensiones geométricas de taludes que garantizan seguridad.

**Palabras Clave:** Sección transversal, Estabilidad de taludes, Métodos numéricos, Elementos Finitos, Recomendaciones.

## Slope stability analysis of typical sections in road construction through numerical models

### Abstract

One of the most important aspects of design is the geometry that a road cross section must adopt after the earthworks necessary for the construction of a road. Therefore, slope stability has become the key element to control. The present investigation focuses on defining safety criteria regarding the height and inclination that a slope of a road cross-section must present, in the presence of four types of chosen materials, fractured shale, silty sand, firm clay and expansive clay; to preserve safety factors that guarantee stability in typical road cross sections such as slope, trench, embankment and mid-slope. The study begins by evaluating geometric recommendations, carrying out the analysis by the Limit Equilibrium Method and by numerical models using the Finite Element Method, supported with the use of application programs in geotechnics. Then a comparative table was made with the safety factors obtained. New geometric dimensions of slopes that guarantee safety were presented for some of the analysis cases.

**Keywords:** Cross section, Slope stability, Numerical methods, Finite Elements, Recommendations.

## **Análise da estabilidade de taludes de trechos típicos de construção rodoviária através de modelos numéricos**

### **Resumo**

Um dos aspectos mais importantes do projeto é a geometria que um corte transversal de estrada deve adotar após as obras de terraplenagem necessárias à construção de uma estrada. Portanto, a estabilidade do talude tornou-se o elemento chave a controlar. A presente investigação centra-se na definição de critérios de segurança relativamente à altura e inclinação que um talude de um trecho rodoviário deve apresentar, na presença de quatro tipos de materiais escolhidos, xisto fracturado, areia siltosa, argila firme e argila expansiva; preservar fatores de segurança que garantam a estabilidade em trechos transversais típicos de estradas, como taludes, valas, taludes e taludes médios. O estudo inicia-se pela avaliação de recomendações geométricas, realizando a análise pelo Método do Equilíbrio Limite e por modelos numéricos pelo Método dos Elementos Finitos, apoiado na utilização de programas aplicativos em geotecnia. Em seguida foi feita uma tabela comparativa com os fatores de segurança obtidos. Novas dimensões geométricas de taludes que garantem segurança foram apresentadas para alguns dos casos de análise.

**Palavras-Chave:** Seção transversal, Estabilidade de taludes, Métodos numéricos, Elementos Finitos, Recomendações.

### **I. INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo de investigación tiene como propósito analizar la estabilidad en taludes de suelo o macizo rocoso presentes en las secciones transversales (ST) de construcción de una carretera. El Método de Equilibrio Límite (MEL) es el análisis de estabilidad más aplicado por su simplicidad, el cual representa el punto de partida de esta investigación, entre sus investigadores se tienen a [2-6], los cuales evalúan la estabilidad a través de factor de seguridad (FS).

Asimismo, otros investigadores como [7-21], han estudiado la estabilidad de taludes utilizando las diferentes metodologías basadas en el tradicional MEL, con la finalidad de determinar que metodología ofrece mayor sencillez y precisión. Los autores [22-30], han estudiado la estabilidad a través de métodos numéricos de simulación, basados tanto en el MEL como en el análisis por el Método de Elementos Finitos (MEF), al igual que otros problemas geotécnicos, utilizando en algunos

casos el software *Slide* [31] (Marca Registrada) y/o *Plaxis* [32] (Marca Registrada). Dado que, en el campo de la ingeniería vial, uno de los principales problemas que se presenta y genera un impacto en la población y en las infraestructuras son los movimientos de masa por taludes inestables, siendo estos eventos impredecibles y difíciles de pronosticar debido a las variantes que puede presentar el material presente en la zona, eventos sísmicos o por un dimensionamiento equivocado en la construcción de un talud. Dependiendo de la magnitud del deslizamiento se pueden ocasionar pérdida de la infraestructura vial, pérdidas económicas y hasta de vidas humanas.

En tal sentido, a lo largo de los años, para la construcción de la ST de una carretera los ingenieros civiles han venido trabajando con tablas referenciales en la toma de decisiones sobre el dimensionamiento de un talud, construidas de acuerdo a experiencias de distintos autores cuya información ha proporcionado confiabilidad. Para esta

investigación se toma como referencia las propuestas por [1].

Por tanto, cuando se plantea el trazado de una carretera y de acuerdo a la topografía de la zona, se generan ST llamadas típicas evaluadas en esta investigación, como la sección en ladera, en trinchera, en terraplén y a media ladera. Debido a la diversidad de materiales, la investigación se delimita para cuatro tipos: Lutita suave de resistencia media muy fracturada, Arenas limosas y limos poco compactos, Arcilla poco arenosa firme (homogénea) y Arcilla muy suave expansiva y compresible. Materiales definidos de ésta manera para presentar valores referenciales tanto en roca, suelos gruesos y suelos finos.

De este modo, a estas secciones se les dio una geometría tanto en altura como en inclinación de talud según las recomendaciones de [1], siendo analizadas a través de las metodologías tradicionales, basadas en el MEL como [2-4] y con el programa *Slide* [31], el cual evalúa las superficies de rotura tomando en cuenta las metodologías tradicionales mencionadas y además las metodologías de autores como [5-6]. Adicionalmente, la estabilidad se evalúa con el programa *Plaxis* [32] basado en el análisis por el MEF, con el fin de establecer los criterios de seguridad de acuerdo al valor obtenido de FS en cada talud de las ST típicas evaluadas.

Finalmente, una vez obtenidos los resultados por las diferentes metodologías de análisis se comparan los valores de FS, lo cual permite emitir una conclusión bien sea favorable o desfavorable, según la estabilidad para las secciones recomendadas y en caso de producirse la rotura definir las dimensiones de talud que la hagan estable al deslizamiento, presentándolas como recomendaciones finales.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las carreteras son uno de los medios de comunicación más importantes que existen en la sociedad, representan la red más flexible y rápida de todos los sistemas de transporte. Su

diseño, construcción y mantenimiento es una tarea que le corresponde a la ingeniería civil, en donde a lo largo de los años ha desarrollado nuevas técnicas para incrementar su tiempo de vida útil, que van más de la mano con el medio ambiente asegurando su disfrute y una mejor calidad de vida. Cuando se plantea una vía, surgen numerosas interrogantes, por todos los aspectos que deben considerarse, desde el punto de vista topográfico, geológico y geomorfológico; para establecer un diseño geométrico acorde a las necesidades sin producir mayores afectaciones al entorno. La geotecnia juega un papel clave, para que el trazado y los elementos que definen las ST de la carretera sean las más idóneas, que de acuerdo a la explicación respecto al terreno original se establecen taludes en corte, taludes en terraplén y/o la combinación de ambas.

Los taludes o laderas son porciones de suelos o roca que presentan una superficie de inclinación respecto a la horizontal, que pueden ser de origen natural, denominados laderas, como los que se aprecian en faldas de cerros y montañas; o de origen antrópico como las que se observan en las obras de construcción de vías, edificaciones y demás alteraciones que el hombre realiza sobre la naturaleza, las cuales se denominan taludes.

Asimismo, estas laderas y taludes representan un sin fin de incertidumbres para el momento de establecer un diseño de infraestructura vial, ya que pueden presentar movimientos desde muy lentos a muy rápidos, debido a diferentes factores, como las precipitaciones, nivel de agua subterránea, viento, meteorización, sismos y sobrecarga; factores que hacen que los taludes se constituyan en peligrosos y represente un riesgo que podría desencadenar incomunicaciones y representar pérdidas tanto económicas como de vidas humanas.

En los estudios geotécnicos que se realizan para establecer la geometría que debe tener un talud para la construcción de una carretera, surgen numerosas interrogantes en torno a la estabilidad que debe presentar dicho talud, en vista que se ha establecido que un talud o

ladera puede fallar a lo largo de un ilimitado número de potenciales superficies de rotura, tal como lo menciona [24]. Todo esto conlleva a tener un número importante de incertidumbres por la variabilidad espacial en las propiedades del suelo, la inducida por la simplificación y aproximación adaptada en los modelos geotécnicos. Siendo ejemplo de ello la geometría y localización de la superficie de rotura en el MEL.

### III. METODOLOGÍA

La metodología del presente estudio comprende seis (6) etapas, mediante las cuales fue posible lograr el objetivo de la investigación: Caracterización de las ST típicas de acuerdo a las recomendaciones existentes para el tipo de material en estudio, Definición de los parámetros de resistencia del material en estudio, Determinación de FS a través de las metodologías probadas sobre estabilidad de taludes, Caracterización utilizando modelos numéricos para el FS en la superficie de rotura de los taludes de las ST en estudio, Comparación de los resultados obtenidos y verificar las recomendaciones geométricas.

En este orden de ideas se describe cada uno de los pasos para lograr los objetivos planteados.

#### 1. Caracterización de las ST típicas

Es necesario establecer las características que definen los taludes en estudio, ya que las opciones en la realidad son infinitas y cada una requiere de su estudio propio. En este sentido, el estudio se delimita para cuatro tipos de materiales: Material 1: Lutita suave de resistencia media muy fracturada. Material 2: Arena limosa y limos poco compactos. Material 3: Arcilla poco arenosa firme (homogénea). Material 4: Arcilla muy suave expansiva y compresible.

Por tanto, en la Tabla I se muestran las recomendaciones geométricas planteadas por [1] para taludes en corte para los materiales seleccionados. De igual forma, la Tabla II

muestra los valores deseables para taludes en terraplén presentados por [33].

**Tabla I:** Dimensionamiento Recomendado de Taludes por [1], Inclinação, Sección en Corte.

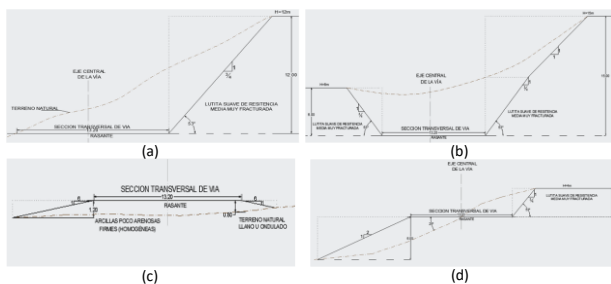
Tipo de material	Talud recomendable (i)			
	Hasta H=5m	H= 5 -- 10m	H= 10 -- 15m	H >15m
1	1/2:1	3/4:1	3/4:1	3/4:1 Hasta H/2 luego 1:1
2	1:1	1:1	1,25:1	1,25:1
3	1/2:1	1/2:1	1/2:1 Hasta H/2 luego 3/4:1	
4	1:1	1,25:1	1,50:1	1,50:1

\* H, es la altura del talud, i, representa la inclinación de talud, relación horizontal:vertical (h:v).

**Tabla II:** Valores Deseables para Taludes en Terraplén, [33], Inclinação, Sección en Terraplén.

Altura del talud (m)	Inclinação del talud, relación horizontal:vertical (h:v)		
	Tipo de terreno		
	Llano u ondulado	De inclinación moderada	Inclinado
≤ 1.25	6:1	4:1	4:1
1.25 a 3.05	4:1	4:1	2:1
3.05 a 4.60	4:1	2,5:1	1,75:1
4.60 a 6.10	2:1	2:1	1,75:1
Mayor de 6.10	2:1	2:1	1,75:1

A continuación, en la Figura 1 se presentan las secciones típicas de carretera construidas de acuerdo a las recomendaciones de [1] para las secciones que involucran corte (ST en ladera, trinchera y media ladera) y de [33] para las que involucran relleno en terraplén (ST terraplén y media ladera). De igual manera, se construyeron las ST para los distintos materiales y alturas.



**Figura 1:** Sección Transversal de Vía. (a) En Ladera a 12 m de Altura para Material 1. (b) En Trinchera a 15 m de Altura para Material 1. (c) En Terraplén a 1.20 m de Altura para Material 3. (d) A Media Ladera a 6 m de Altura para Material 1.

Entonces, para ST en ladera se consideraron alturas en taludes de 8 m y 12 m. De igual manera, para las ST en trinchera fueron evaluadas para una altura de 5 m y 15 m, es importante aclarar, que para alturas de talud de 15 m el análisis se concentra en el talud ubicado a la derecha de la trinchera y para alturas de talud de 5 m en el talud ubicado a la izquierda, por ser los más desfavorables por tener la mayor altura en la ST.

Asimismo, para ST en terraplén se consideró topografía llana u ondulada del terreno natural sobre el que se funda el terraplén y alturas del mismo de 1,2 m, 4 m y 5 m. Es importante aclarar que el análisis de las ST en terraplén sólo se analizó el material 3.

De igual forma, las ST típicas a media ladera fueron evaluadas para alturas de talud de 6 m, el análisis se realizó sobre la parte de la sección en terraplén, ya que la parte en ladera de la sección se diseñó con las mismas dimensiones recomendadas en corte para el mismo material y ya han sido evaluadas en las secciones previas.

## 2. Definición de los parámetros de resistencia

El estudio se realizó a los cuatro tipos de materiales seleccionados. Cada tipo de material está definido por sus propiedades elásticas y mecánicas cuyas características se describen en la Tabla III, valores tomados del manual del programa *Plaxis V.8* [32] los cuales se usan como referencia y se consideran adecuados, si bien es cierto, que el

material es muy variable en sus propiedades dependiendo de su origen y condiciones a la que esté sometido.

Seguidamente, se consideró cada material en condición drenada para simplificar la investigación y ser más acertado con las recomendaciones geométricas que presenta [1], considerando que las mismas no precisan ninguna información sobre los parámetros de resistencia y condiciones sobre cada material.

**Tabla III.** Propiedades Elásticas y Mecánicas de Los Materiales en Estudio.

(*) Tipo de material	$\gamma_h$	$\gamma_{sat}$	$K_x=K_y$	E	$\nu$	C	$\phi$
	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	m/d	kN/m <sup>2</sup>		kN/m <sup>2</sup>	(°)
1	20	22	0,001	5000	0,30	10,50	20
2	18	20	0,009	5000	0,30	20,00	30
3	16	18	0	5000	0,35	12,50	17
4	16	18	0	5000	0,35	100,00	20

\*  $\gamma_h$ , es el peso específico del suelo en condición húmeda,  $\gamma_{sat}$ , es el peso específico del suelo saturado,  $K_x$  y  $K_y$ , representa el coeficiente de permeabilidad del suelo, E, representa el módulo de Young,  $\nu$ , es el coeficiente de Poisson, C, define la cohesión del material,  $\phi$ , representa el ángulo de fricción interna del suelo.

## 3. Determinación de factor de seguridad

### 3.1 Utilizando metodologías tradicionales

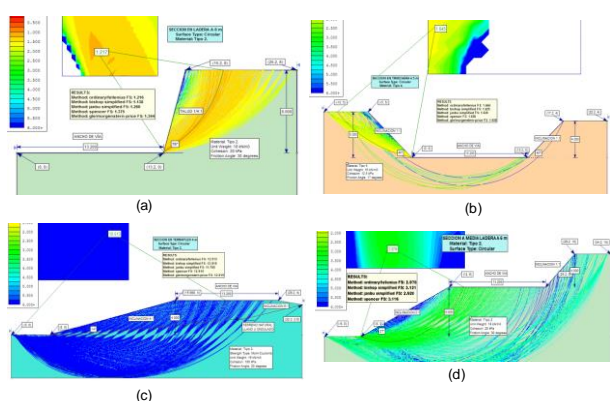
Haciendo uso de las metodologías probadas para el análisis de estabilidad de taludes se obtiene FS para cada una de las ST recomendadas, seleccionando para éste análisis los métodos de [2-4], por ser las metodologías tradicionales más sencillas de desarrollar por su simplicidad.

### 3.2 Utilizando el programa Slide versión 6.0 [31]

El programa *Slide* [31], es funcional para problemas con deformaciones planas en geometrías con sección transversal uniforme donde se pueda suponer que los estados tensionales y de carga son uniformes a lo largo de la dirección perpendicular a la sección transversal, realizando un análisis paramétrico. Basado en el MEL evalúa la estabilidad de taludes a través de FS utilizando el método que se conoce como reducción de resistencia

al cortante, basado en el criterio de Mohr-Coulomb se reduce gradualmente los parámetros de resistencia al corte (cohesión (C) y ángulo de fricción interna del suelo ( $\phi$ )) provocando la rotura inicial y finalmente la rotura global. Se utilizó las metodologías de [2-6] para el análisis de FS.

A continuación, en la Figura 2 se detallan cuatro ST típicas para la observación de las superficies de rotura generadas a partir de los datos suministrados en el programa *Slide* [31].



**Figura 2:** Imagen *Slide* [31]. Factor de Seguridad (FS), Superficie de Rotura. (a) ST en Ladera para El Material 2. (b) ST en Trinchera, Material 4. (c) ST en Terraplén, Material 3. (d) ST a Media Ladera, Material 2.

### 3.3 Utilizando modelos numéricos con el programa *Plaxis* versión 8.2. [32]

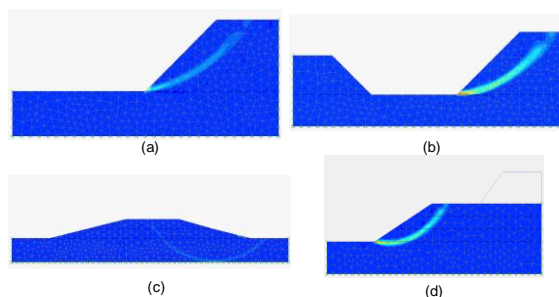
Esta fase se llevó a cabo utilizando como herramienta el programa *Plaxis* versión 8.2 [32], este programa computacional utiliza el MEF para el cálculo por simulación de deformaciones, esfuerzos y estabilidad para diferentes casos de aplicación geotécnica, el programa tienen como limitante que el MEF que usa es para modelación de problemas con deformaciones planas, en geometrías con sección transversal uniforme donde se pueda suponer que los estados tensionales y de carga son uniformes a lo largo de la dirección perpendicular a la sección transversal, realizando un análisis paramétrico.

Por otra parte, una ventaja importante que presenta el programa es la utilización de una interfaz gráfica (Sistema CAD) que permite

generar un modelo geométrico de forma rápida y sencilla. *Plaxis* [32] evalúa la estabilidad de taludes a través de FS, utilizando el método que se conoce como modelo de elementos finitos de reducción de resistencia al cortante, basado en el criterio de Mohr-Coulomb se reduce gradualmente los parámetros de resistencia al corte (cohesión (C) y ángulo de fricción interna del suelo ( $\phi$ )) provocando la rotura inicial y finalmente la rotura global.

Luego, para el análisis se crea un modelo con la geometría representativa de cada ST, asignando el tipo de material, parámetros de resistencia, propiedades del mismo y condiciones de contorno. Seguidamente, se realiza la discretización o generación de la malla de elementos finitos, se establece la posición del nivel freático, la generación de presión de poros, las presiones efectivas iniciales sobre el modelo y se introducen las fases de cálculo de deformaciones.

Como consecuencia, el programa presenta las deformaciones totales por cortante mostradas en la Figura 3, obtenidas en el modelo geométrico analizado para cada tipo de ST, para luego, determinar el FS.



**Figura 3:** Imagen *Plaxis* [32]. Deformaciones Totales por Cortante. (a) ST en Ladera para Material 2, Altura 8 m. (b) ST en Trinchera, Material 4, Altura 5 m. (c) ST en Terraplén, Material 3, Altura 4 m. (d) ST a Media Ladera, Material 1, Altura 6 m.

### 4. Comparación de los resultados obtenidos y verificar las recomendaciones geométricas

En este orden de ideas, se anexa la Tabla IV que describe los rangos de FS favorables establecidos por [34] lo que permite clasificar el FS promedio obtenido por las diferentes

metodologías, compararlos y emitir las conclusiones y recomendaciones pertinentes sobre la geometría del talud analizado.

**Tabla IV:** Recomendaciones de FS Según [34].

Rango del FS en taludes	
FS	Significado
< 1	Inseguro (I)
1 – 1,20	Seguridad cuestionable (C)
1,30 – 1,40	Satisfactorio para: Corte y terraplenes (Sa)
> 1,50	Seguro para presas (S)

#### IV. RESULTADOS

El estudio comparativo de la presente investigación pretende establecer criterios que sean utilizados con mayor confiabilidad en la toma de decisiones inherentes en cualquier proyecto vial, con la finalidad que para los tipos de materiales analizados se tenga mayor seguridad al momento de realizar la construcción de una ST de vía con dimensiones que generen taludes con menor probabilidad de rotura.

A continuación, se detalla en la Tabla V y V.I(continuación), los resultados obtenidos de FS utilizando los métodos tradicionales de [2-4] por el programa computacional Slide [31] utilizando las metodologías de [2-6] y con el programa *Plaxis* [32]. Análisis realizado para cada ST típica de carretera estudiada, considerando las dimensiones de talud recomendadas por [1] y [33] para cada material establecido. De igual forma, la Tabla V.II (continuación), muestra el análisis comparando los resultados de FS promedio entre las metodologías tradicionales y por simulación con las recomendaciones de [34] presentadas en la Tabla IV en cuanto a la seguridad al deslizamiento.

**Tabla V:** Valores de FS. Metodologías Tradicionales, Programa *Slide* [31], Programa *Plaxis* [32]. Comparación con Recomendaciones de [34].

Sección transversal	Material	Geometría del talud		FS Metodologías tradicionales		
		H (m)	Inclinación h:v	[2]	[3]	[4]
Ladera	1	8	3/4:1	1,28	0,84	1,55
Ladera	1	12	3/4:1	0,83	1,02	0,75
Ladera	2	8	1:1	1,54	1,93	1,84
Ladera	2	12	1,25:1	1,11	1,09	1,62
Ladera	3	8	1/2:1	4,51	3,76	4,68
Ladera	3	12	1/2:1 y 3/4:1 (*)	3,75	4,20	4,20
Ladera	4	8	1,25:1	1,19	0,84	1,36
Ladera	4	12	1,50:1	1,09	0,86	1,24
Trinchera	1	5	1/2:1	1,24	1,17	1,26
Trinchera	1	15	3/4:1 y 1:1 (*)	1,20	0,84	1,19
Trinchera	2	5	1:1	1,54	1,93	1,84
Trinchera	2	15	1,25:1	1,11	1,09	1,62
Trinchera	3	5	1:1	4,51	3,76	4,68
Trinchera	3	15	1/2:1 y 3/4:1 (*)	3,75	4,20	4,20
Trinchera	4	5	1:1	1,52	1,04	1,89
Trinchera	4	15	1,5:1	1,09	0,86	1,24
Terraplén	3	1,2	6:1	41,69	31,83	42,02
Terraplén	3	4	4:1	11,55	12,33	12,09
Terraplén	3	5	2:1	8,45	8,09	8,63
Media Ladera	1	6	2:1	1,47	1,40	1,68
Media Ladera	2	6	2:1	2,73	2,17	2,70
Media Ladera	3	6	2:1	6,80	6,73	7,18
Media Ladera	4	6	2:1	1,69	1,60	1,98

(\*) Cambio de inclinación a media altura

**Tabla V.I (continuación).**

FS Slide [31]					FS Plaxis [32]
[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	
0,87	0,87	0,89	0,89	0,89	0,69
0,72	0,71	0,74	0,74	0,74	0,73
1,21	1,26	1,13	1,34	1,37	1,60
1,13	1,14	1,14	1,15	1,14	1,63
4,58	4,82	4,53	5,33	5,33	4,12
3,36	3,47	3,34	3,89	3,87	3,10
1,28	1,26	1,34	1,34	1,33	1,20
1,09	1,07	1,15	1,14	1,15	1,12
1,02	1,03	1,02	1,03	1,02	0,99
0,69	0,69	0,72	0,72	0,72	0,63
2,39	2,38	2,45	2,45	2,54	2,40
1,51	1,49	1,60	1,59	1,59	1,51
7,31	7,50	7,29	7,50	7,90	6,10
2,97	3,39	2,92	4,27	4,28	2,40
1,63	1,66	1,65	1,65	1,65	1,10
0,99	0,97	1,04	1,04	1,04	0,85
35,70	33,50	36,80	36,80	36,80	38,50
13,80	12,90	14,20	14,20	14,20	13,80
9,01	8,74	9,36	9,35	9,36	7,80
1,66	1,63	1,72	1,72	1,72	1,40
2,90	2,92	3,12	3,10	3,11	1,10
7,14	6,61	7,40	7,39	7,39	6,80
1,82	1,87	1,89	1,89	1,89	1,20

**Tabla V.II (continuación).**

FS Promedio	Comparación con recomendaciones de [34] para el FS
0,94	Inseguro
0,77	Inseguro
1,46	Satisfactorio
1,26	Satisfactorio
4,70	Seguro
3,67	Seguro
1,25	Satisfactorio
1,11	Seguridad cuestionable
1,07	Seguridad cuestionable
0,79	Inseguro
2,28	Seguro
1,48	Satisfactorio
6,50	Seguro
3,61	Seguro
1,52	Seguro
1,00	Seguridad cuestionable
37,15	Seguro
13,44	Seguro
8,78	Seguro
1,60	Seguro
2,60	Seguro
7,09	Seguro
1,73	Seguro

Finalmente, para los casos mostrados en la Tabla V.II(continuación), los resultados donde el talud se considera inseguro o con seguridad cuestionable, hay que tomar medidas que garanticen la estabilidad. Comparando estos resultados con las recomendaciones geométricas de [1] donde sólo se considera como medida de estabilización el reducir la inclinación del talud, se hará un nuevo análisis por modelos numéricos recomendando una nueva inclinación, mostrado en la Tabla VI y VI(continuación). Por otra parte, donde los valores de FS superan por mucho el valor de 1,50, considerado por [34] como seguro, se podría recomendar aumentar la inclinación de estos taludes.

**Tabla VI. Análisis Comparativo del FS con Recomendaciones de [34]. Nuevas Inclinaciones Recomendadas.**

Sección Transversal	Tipo de material	Geometría del talud		
		H (m)	Inclinación h:v [1]	Nueva Inclinación Recomendada
Ladera	1	12	3/4:1	2:1
Ladera	1	8	3/4:1	2:1
Ladera	4	12	1,50:1	2:1
Trinchera	1	15	3/4:1 y 1:1 (*)	2:1
Trinchera	1	5	1/2:1	2:1
Trinchera	4	15	1,5:1	2:1

(\*) Cambio de inclinación a media altura.

**Tabla VI (continuación).**

FS Slide [31]					FS Plaxis [32]	Comparación con recomendaciones de [34] para FS
[2]	[3]	[4]	[5]	[6]		
1,38	1,33	1,47	1,42	1,41	1,35	Satisfactorio
1,42	1,39	1,55	1,51	1,51	1,47	Satisfactorio
1,33	1,28	1,40	1,38	1,37	1,28	Satisfactorio
1,23	1,21	1,37	1,33	1,33	1,37	Satisfactorio
1,51	1,47	1,58	1,55	1,55	2,30	Seguro
1,28	1,24	1,35	1,33	1,33	1,20	Satisfactorio



## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la mayoría de los casos presentados en la Tabla V, V.I(continuación) y V.II(continuación), el FS obtenido en cada una de las ST de vía analizadas, evidencian que los estudios sobre estabilidad de taludes en donde se implementan tanto el MEL como el MEF representan criterios de seguridad a la hora de establecer la geometría de un talud, demostrando que los métodos numéricos son una herramienta útil y eficiente a la hora de evaluar estabilidad de taludes.

Sin embargo, para aquellos casos donde los valores de FS representan inseguridad en la estabilidad del talud, se analizó de nuevo la estabilidad cambiando las recomendaciones geométricas dadas por [1], disminuyendo la inclinación con el fin de mejorar la estabilidad al deslizamiento y de esta manera presentar en la Tabla VI y VI(continuación) unas nuevas recomendaciones geométricas.

### *Recomendaciones*

Para los casos donde la geometría recomendada por [1] no arroje resultados satisfactorios para el FS (Tabla V.II. continuación), se puede disminuir la inclinación del talud y además se recomienda: evaluar métodos de estabilización como la implementación de estabilización vegetal, el terraceo, las fajas de coronamiento, la construcción de contrafuertes, las pantallas atirantadas, entre otros.

Por otra parte, se debe considerar que, disminuir en un grado alto la pendiente de un talud trae como consecuencia inconvenientes al momento de su construcción, esto debido a las dimensiones que pueden generarse del mismo, la incomodidad, el mayor movimiento de tierra, el mayor gasto en la ejecución y el mayor impacto ambiental.

Aunado a esto, es de suma importancia aclarar que la presente investigación consideró casos sencillos de análisis. Por tanto, al realizar un análisis de estabilidad hay que evaluar las condiciones particulares a las que pueda estar sometido el material en la zona de

estudio, como por ejemplo; la condición de saturación, la presencia y ubicación del nivel freático, la actividad sísmica, la meteorización, la estratificación y la presencia de diaclasas.

## REFERENCIAS

- [1] Andueza, P. Diseño geométrico de carreteras. Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela, 1ed,194,1999.
- [2] Fellenius, W. "Calculation of stability of earth dams". Transactions, Second Congress, Large Dams, Vol. 4, 445,1936.
- [3] Janbu, N. "Stability analysis of slopes with dimensionless parameters". PhD thesis, Cambridge, Massachussets, Harvard University, 81, 1954.
- [4] Bishop, A. "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes". Geotechnique. Vol. 5, 7-17, 1955.
- [5] Morgenstern, N. and Price, V. "The analysis of stability of general slip surfaces". Geotechnique. Vol. 15, 79-93, 1965.
- [6] Spencer, E. "A method of analysis for stability of the embankment using parallel inter-slice forces". Geotechnique. Vol. 17, 11-26, 1967.
- [7] Pereira, M. "Modelos de análisis de estabilidad de taludes". Universidad Central de Venezuela. Caracas Venezuela, 2012.
- [8] Michalowski, R. "Stability assessment of slopes with cracks using limit analysis". Canadian Geotechnical Journal. Vol. 50, nº. 10, 1001–1021, 2013. DOI: 10.1139/cgj-2012-0448.
- [9] Utili, S.: "Investigation by limit analysis on the stability of slopes with

- cracks". Géotechnique. Vol. 63, n°. 2, 140–154, 2013. DOI: 10.1680/geot.11.P.068.
- [10] Mehdipour, I., Ghazavi, M. and Moayed, R. "Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect". Geotextiles and Geomembranes. Vol. 37, n°. 4, 23–34, 2013. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2013.01.001.
- [11] Cheng, M. and Xie, C. "Investigation on the stability of slopes with cracks subjected to seismic effect". Vol. 19, Bund. R, 2014.
- [12] Akram H, A. (2014). Seismic displacement of geosynthetic-reinforced slopes subject to cracks. International symposium on geohazards and geomechanics. Conf. Series: Earth and Environmental Science 26 (2015). Civil Engineering Dept., College of Engineering, Tikrit University, Tikrit, Iraq, 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/26/1/012045.
- [13] Belandria, N. "Desarrollo de un método para el cálculo generalizado de estabilidad de taludes, basado en técnicas innovadoras del cálculo matemático y computacional". Tesis doctoral Universidad de Los Andes, Venezuela, 2015.
- [14] Yong-xin, L. and Xiao-li, Y. "Stability analysis of crack slope considering nonlinearity and water pressure". KSCE Journal of Civil Engineering (2016) 20(6):2289-2296 Copyright 2016 Korean Society of Civil Engineers, 2015. DOI: 10.1007/s12205-015-0197-3.
- [15] Lian-Heng, Z., Xiao, C., Yingbin, Z., Liang, L. and De-Jian, L. "Stability analysis of seismic slopes with cracks". Computers and Geotechnics. Vol 77, 77–90, 2016.
- [16] Tang, S., Huang, R., Tang, C., Liang, Z. and Heap, M. "The failure processes analysis of rock slope using numerical modelling techniques". Engineering Failure Analysis. 2017. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.06.029.
- [17] Wei, G., Shuang, D., Ting, X. and Tianyang, H. "Failure process of rock slopes with cracks based on the fracture mechanics method". Enggeo. 2017. DOI:10.1016/j.enggeo.2017.10.020
- [18] Belandria, N., Herrera, F. "Vulnerabilidad geotécnica del borde de la terraza de Mérida. Venezuela". Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela, 2018.
- [19] Michalowski, R. "A cone surface in 3d analyses of slopes with tension cut-off". 2018. DOI: 10.1680/jgere.18.00003.
- [20] Noguera, V. "Análisis geotécnico de la estabilidad de taludes a lo largo del río Albarrégas desde el sector El Rodeo hasta el viaducto Campo Elías, Mérida, Venezuela". Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela, 2018.
- [21] Shuwei, Z. "Adaptive phase field simulation of quasi-static crack propagation in rocks". Underground Space, 2018. DOI: 10.1016/j.undsp.2018.04.006
- [22] Orozco, K. "Estabilidad de taludes en suelos residuales evaluado en corto y largo plazo ". Universidad EAFIT, Medellín Colombia, 2013.
- [23] Tardeo, C. "Análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos en la zona de Huayllapampa del Distrito de Cuenca – Huancavelica". Universidad Nacional de Huancavelica, Perú, 2016.

- [24] Peña, G. "Estudio probabilístico de la estabilidad del talud de la terraza de Mérida Venezuela". Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela, 2017.
- [25] Rosales, E. "Análisis probabilístico de la estabilidad del talud alto chama de la ciudad de Mérida. Venezuela". Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela, 2018.
- [26] Silva, P. "Análisis comparativo de estabilidad de talud y propuesta de solución con muros anclados en la carretera Las Pirias-Cajamarca Perú. Perú, 2018.
- [27] Briceño, J., Uzcategui, A., Belandria, N., León F., Verjel V. "Asentamientos en fundaciones continuas con modelos numéricos de simulación con elementos finitos". Revista Ciencias e Ingeniería, Vol. 41, n° 2. Universidad de Los Andes, Venezuela, 2020. 157-166, ISSN 1316-7081, ISSN Elect. 2244-8780.
- [28] Briceño, J., Belandria, N., León, F. (2020). Asentamientos en fundaciones continuas con análisis sísmico utilizando modelos numéricos. Congreso venezolano de geotecnia 2020.
- [29] Briceño, J., Matos, Y., Belandria, N., León, F. "Evaluación de la estabilidad en muro ciclópeo y voladizo utilizando modelos numéricos". Revista Ingeniería Universidad de Carabobo, Venezuela, Vol. 29, n° 1, 96-103, 2022.
- [30] Briceño, J., Belandria, N., León, F. "Ubicación y profundidad de la grieta de tracción en taludes con el empleo de modelos numéricos". Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia, Venezuela, Vol. 45, n° 2, 111-121, 2022.
- [31] Rocscience. Slide. Software, 2004.
- [32] Programa computacional Plaxis V.8.2 bidimensional, editado por R.B.J Brinkgreve Delft University of Technology & PLAXIS b.v. The Netherlands.
- [33] The american association of state highway and transportation officials (AASHTO) Part 1 Specifications, Part 2 Methods of sampling and testing, Fourteenth Edition. Standar specifications for the transportation materials and methods of sampling and testing, 1986.
- [34]. Sowers and Sowers. "Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones", 1970.