

Evaluación del efecto del flujo de agua subterránea en sección transversal de carretera utilizando modelos numéricos

Evaluation of the effect of groundwater flow on a highway cross section using numerical models

Briceño, Johannes^{1,2*}; Belandria, Norly³; León, Francisco⁴; Rivero, Davielys¹; Ortega, Carlos¹

¹Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

²Postgrado de Ingeniería Vial, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

³Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

⁴Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

*ingjebb@gmail.com

Resumen

El flujo de agua subterránea proveniente de un talud o por escurrimiento, afecta la sección transversal de una carretera, produciendo daños en su transitabilidad. Asimismo, la evacuación de agua subsuperficiales o subterráneas mediante obras de drenaje depende de la posición del nivel freático, tipo de suelo, entre otras (Ponce, 2018). Este estudio se realizó utilizando modelos numéricos basados en el método de elementos finitos, caracterizando previamente el material mediante ensayos de laboratorio. La situación actual que presenta la sección transversal en estudio, es de deformación en la calzada, inestabilidad en el talud y deterioro en la estructura del pavimento; debido a la ubicación del nivel freático, posible emanación constante de aguas de depósitos superficiales y condiciones de drenaje subterráneo. El modelo de aplicación presentó tres condiciones de estudio, donde estas variaban la ubicación del nivel freático y desempeño del subdrenaje existente, en condición estática y dinámica. Se tomó en cuenta como parámetros de referencia el desplazamiento horizontal, desplazamiento vertical, factor de seguridad y velocidad de desplazamiento del flujo. Se puede decir, de manera general, que la presencia de agua en el talud desmejora su estabilidad (Sowers y Sowers, 1970), aumenta el desplazamiento y por tanto la deformación de la calzada; además, el subdrenaje existente tiene poca influencia en mejorar las condiciones de estabilidad de la sección transversal.

Palabras clave: Estabilidad de talud, Deformación de la calzada, Líneas de flujo, Obras de drenaje, Modelos numéricos.

Abstract

The flow of groundwater from a slope or by runoff affects the cross section of a highway, causing damage to its passability. Likewise, the evacuation of subsurface or underground water through drainage works depends on the position of the water table, type of soil, among others (Ponce, 2018). This study was carried out using numerical models based on the finite element method, previously characterizing the material through laboratory tests. The current situation presented by the cross section under study is one of deformation in the roadway, instability in the slope and deterioration in the structure of the pavement; due to the location of the water table, possible constant emanation of water from surface deposits and underground drainage conditions. The application model presented three study conditions, where they varied the location of the phreatic level and the performance of the existing subdrainage, in static and dynamic conditions. Horizontal displacement, vertical displacement, safety factor and flow displacement speed were taken into account as reference parameters. In general, it can be said that the presence of water on the slope impairs its stability (Sowers and Sowers, 1970), increases the displacement and therefore the deformation of the roadway; furthermore, the existing underdrainage has little influence on improving the stability conditions of the cross section.

Keywords: Slope stability, Road deformation, Flow lines, Drainage works, Numerical models.

1 Introducción

Históricamente el hombre a usado caminos de tierra para el traslado de tropas y ejército, desde la antigüedad se trasladaba por senderos, pero a medida que la sociedad fue progresando estos tuvieron mayor importancia en el área económica. Con la implementación de nuevos medios de transporte y afán del hombre por mejorar en su economía, se implementaron nuevas tecnologías que lograron mejorar la comunicación vial entre pueblos, regiones y países. A su vez, esto implicaba riesgos de carácter geotécnico.

De igual forma, la geotecnia busca brindar soluciones a los problemas en proyectos y obras civiles, tales como construcción de fundaciones superficiales y profundas, construcción de túneles, mejora del suelo (mecánica de suelos), transporte (carreteras, ferrocarriles y túneles) y estabilidad de taludes.

Las carreteras se construyen a través de la intervención del terreno original mediante el movimiento de tierra, generando así, terraplenes o taludes de corte que junto a la calzada conforman las secciones transversales de la misma.

Los taludes son inclinaciones de suelo respecto a la horizontal que pueden ser temporal o permanente (Valiente y col., 2015), estos tipos de estructuras están sujetas a una serie de factores internos y externos que influyen en su diseño como son precipitaciones, meteorización, flujos de aguas subterráneas, geometría, vientos, sismos, presencia de grietas de tracción (Briceño y col., 2022) y sobrecargas que alteran la estabilidad del mismo comprometiendo la calzada.

Por otro lado, el diseño geométrico de una vía puede presentar diferentes configuraciones de secciones transversales, estas pueden ser: sección en terraplén, sección en trinchera, sección en ladera y sección a media ladera (Andueza, 1999). En cualquier caso es importante garantizar la estabilidad del talud, los cuales son afectados por factores geológicos, geométricos, mecánicos, elásticos, hidrogeológicos, hidrogeomorfológicos, entre otros.

Las secciones transversales de carretera están expuestas a fallas por deslizamiento o desprendimiento de material, trayendo como consecuencia obstaculización del paso, poniendo en riesgo y/o peligro tanto a la población del sitio, poblaciones cercanas y automovilistas. Al mismo tiempo, se crean retrasos de comunicación parcial o

total, pérdidas económicas e incluso humanas, ya sea por el deslizamiento del talud o por la falta de comunicación no permitiendo el acceso de personal médico o de ayuda de un punto a otro.

Por otro lado, la presencia de agua en el talud es uno de los principales causantes de inestabilidad; la disminución de resistencia del terreno, el aumento del peso del material por saturación, reducción de la resistencia al corte, erosión a causa de flujos subterráneos y superficiales, meteorización y alteración de la composición mineralógica, son problemas que aumentan la inestabilidad del talud teniendo como consecuencia rotura del material.

El agua tienen gran influencia en la estabilidad de taludes, durante o luego de un periodo fuerte de lluvias ocurren afectaciones en los mismos.

A pesar de qué, el agua en un talud puede ser depositada en un sistema de drenajes que pueden estar ubicados en la cresta, pie y parte subterránea; la construcción, diseños erróneos, la falta de mantenimiento y deterioro de estos conductos o canales pueden generar erosión interna del suelo; provocando arrastre de los materiales finos aumentando la inestabilidad, con ello problemas de deslizamientos en la sección transversal y deformación en la calzada. Además, la falla del talud trae como consecuencia incomunicación vial, pérdidas humanas y económicas.

Cabe destacar, factores de tipo desencadenantes como: cargas estáticas y dinámicas, estas son participes en la afectación de la estabilidad del talud, la primera son causadas por construcción de edificaciones, tránsito de vehículos pesados y material de relleno en la cabecera; que incrementan las fuerzas ejercidas sobre el talud. La segunda está relacionada a movimientos sísmicos, naturales o inducidos que son aplicados de forma instantánea. En ambos casos de sobrecarga, se ve comprometida la estabilidad a causa de fallas por rotura del suelo o roca.

Por lo consiguiente, la estabilidad de la sección transversal se ve afectada directamente por la presencia y ubicación del nivel freático, esta alteración puede ser por deformación de calzadas, desestabilización de taludes, afectación de estructura de pavimento, entre otras. Cuando la ubicación del nivel freático en el talud es alta, puede producir por diferencia de gradiente hidráulico, flujo de agua bajo la calzada, arrastre de finos del suelo de fundación, deformación y colapso de la sección transversal.

Es importante señalar, un número infinito de factores que influyen en la estabilidad del talud, la omisión de cada uno de estos compromete la seguridad, vida del conductor y comunicación entre ciudades; además la presencia de rotura por deslizamiento aumenta el costo de mantenimiento, disminuye el nivel de servicio de la vía y afecta la calzada. Es por ello, que se deben cumplir con los requerimientos mínimos de seguridad con el fin evitar situaciones de riesgo a corto, mediano y largo plazo.

Asimismo, con el pasar de los años autores logran establecer un factor de seguridad (FS) para brindar mayor confianza a la hora de la construcción de una obra, estableciendo rangos de control para la vulnerabilidad como es el caso de la estabilidad de taludes, y así, resolver interrogantes planteadas usando como apoyo tablas referenciales.

Con el avance de tecnologías han surgido una cantidad de programas de aplicación en el área de la geotecnia, que utilizando modelos numéricos basados en el Método de Elementos Finitos (MEF) que dan propuestas o soluciones a problemas más complejos y agilizan las técnicas que se aplicaban anteriormente en el estudio tradicional sobre la estabilidad de taludes, como el Método de Equilibrio de Límite (MEL) basado en el criterio de rotura de Mohr – Coulomb (Briceño y col., 2020).

La sección transversal a evaluar objeto de esta investigación, ubicada en el sector La González, Municipio Sucre del Estado Mérida – Venezuela, sobre la troncal 007 en el tramo entre la población de La González y la entrada a la población de San Juan de Lagunillas, ambas en el municipio Sucre, sufre de deformación excesiva de toda la calzada, estructura de pavimento y además; inestabilidad en el talud de corte. Se tuvo como objeto determinar el efecto del flujo de agua subterránea en la sección transversal de carretera, para ello se utilizó un programa comercial de análisis de elementos finitos a la hora de modelar la situación real en estudio y de esta manera, poder comparar y analizar de forma más eficiente el comportamiento de la sección y del talud, sometido a diferentes condiciones para el análisis estático y dinámico.

En este orden de ideas esta investigación tratará de encontrar respuesta a las siguientes preguntas: ¿Afecta la ubicación del nivel freático la estabilidad del talud de la sección transversal? ¿Afecta el flujo de agua subterránea infiltrada la calzada de la sección transversal? ¿Afecta el flujo

de agua subterránea infiltrada a la estructura de pavimento causando deformaciones en la calzada?

Igualmente, con la evaluación realizada se emitió una conclusión si el talud es estable o inestable, dependiendo de las recomendaciones utilizadas (Sowers y col., 1970). En caso de ser desfavorable se proponen recomendaciones para mitigar el problema y mejorar el servicio y seguridad de la vía.

2 Marco metodológico

Para desarrollar esta investigación se estableció una metodología que comprende cinco (5) etapas mediante las cuales fue posible lograr el objetivo. Estas etapas fueron: Caracterizar mediante ensayos de laboratorio el material presente en el sitio de aplicación del modelo, luego; Analizar la situación actual de la sección transversal real de aplicación, seguidamente; Modelar una sección transversal de carretera mediante programas de aplicación geotécnica y de análisis de elementos finitos, posteriormente; Aplicar el modelo presentado a la sección transversal de aplicación con distintas ubicaciones del nivel freático, finalmente; Analizar resultados de modo que se establezcan posibles recomendaciones.

En este orden de ideas se describe cada una de las etapas para lograr los objetivos planteados.

2.1 Caracterizar mediante ensayos de laboratorio el material presente en el sitio de aplicación del modelo

Para cumplir los objetivos de la investigación planteada se debe realizar ensayo al material de suelo perteneciente al talud en estudio y así, conocer las propiedades mecánicas y elásticas del mismo. De este modo, se obtienen las siguientes propiedades del material empleando el ensayo de granulometría por tamizado (ASTM D 422), límites de consistencia (ASTM D 4318), corte directo (ASTM D 3080), tracción indirecta (ASTM C 496) y compresión simple (ASTM D 2166). En la Tabla 1, se muestran las propiedades mecánicas y elásticas del suelo.

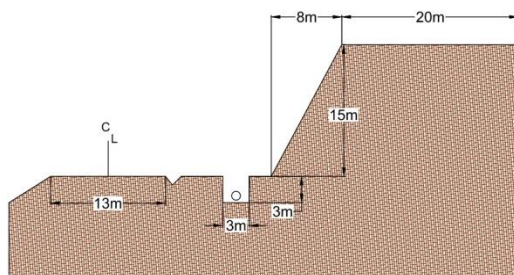
Tabla 1. Propiedades mecánicas y elásticas del suelo.

Material tipo	Arena - arcillosa
Cohesión (C)	28,1 kn/m ²
Módulo de elasticidad (E)	3,5E4 kn/m ²
Peso específico húmedo (γ_h)	18.4 kn/m ²
Peso específico saturado (γ_{sat})	21 kn/m ²
Módulo de Poisson (recomendación) (ν)	0,35

2.2 Analizar la situación actual de la sección transversal real de aplicación

Las secciones transversales de carretera poseen diferentes configuraciones geométricas, estas pueden ser en trinchera, ladera, a media ladera y en terraplén (Andueza, 1999). Estas cumplen con los requerimientos mínimos en el diseño geométrico del talud, así garantizando estabilidad, seguridad y eficiencia de la vía.

La sección transversal de la vía en estudio es a media ladera según su configuración geométrica, con las siguientes dimensiones, mostradas en la Figura 1.

**Figura 1.** Sección transversal y talud de la carretera del sector La González.

El análisis de la sección transversal de la vía en el sector La González, es afectada por diversos factores internos y externos. La influencia del flujo de agua, la ubicación del nivel freático y las condiciones de drenaje subterráneo en la sección trasversal, están directamente relacionados a las causas de la afectación de la calzada, a su vez, comprometen la estabilidad del talud.

En el talud del sector La González (Figura 2),

se observa la emanación constante de aguas posiblemente de depósitos artificiales ubicados en la corona del talud para el riego de cultivos y agua infiltrada del sistema de conos de deyección o abanicos aluviales presentes aguas arriba del mega deslizamiento de La González, teniendo como consecuencia la afectación de la calzada e inestabilidad del talud.

**Figura 2.** Emanación de agua del talud ubicado en el sector La González.

La ubicación de un drenaje es importante para la recolección de aguas subterráneas y de escorrentía proveniente del talud, la profundidad y diseño del mismo es fundamental para su buen funcionamiento. El subdrenaje existente se muestra en la Figura 3, el cual tiene un ancho de 2 m y una profundidad de 3 m, con relleno granular envuelto en material geotextil.

**Figura 3.** Subdrenaje de la sección transversal de carretera ubicada en el sector La González.

Por otro lado, la intención de construir un subdrenaje fue disminuir la infiltración de agua en la calzada y así, minimizar la deformación de la misma y el deterioro de la carpeta asfáltica.

En la Figura 4, se observa la deformación de la calzada de la sección transversal del sector La González.



Figura 4. Deformación de la calzada de la carretera del sector La González.

Así mismo, la calzada muestra una falla de forma longitudinal con aproximadamente 15 cm de desplazamiento vertical, observándose en la Figura 5.



Figura 5. Deformación y falla de la calzada de la carretera del sector La González.

Por otro lado, la sección transversal se estudió utilizando programa de aplicación geotécnica (MEF), recreando la situación real estudiada en campo mediante visitas técnicas, estudio de material “*in situ*” y ensayos de laboratorio.

2.3 Modelar una sección transversal de carretera mediante programa de aplicación geotécnica y de análisis de elemento finitos

La utilización del programa de aplicación geotécnica, facilita el análisis de manera sencilla de

la deformación y estabilidad del talud de la sección transversal, mediante modelado.

Así mismo, para modelar la sección transversal del sector La González se usaron las dimensiones reales del talud y las propiedades mecánicas y elásticas del suelo, que fueron obtenidas en el laboratorio. Se evaluaron tres condiciones de drenaje con diferentes posiciones del nivel freático, entre ellas la presencia del subdrenaje existente. Esto permitirá simular la sección en la situación actual, permitiendo evaluar las fallas presentes en la sección transversal, evaluar la estabilidad del talud, posibilitando la propuesta de soluciones al problema.

En este modelado se evaluará las deformaciones o desplazamientos (verticales o asentamientos, horizontales y de la malla de elementos finitos), estabilidad del talud utilizando el parámetro de factor de seguridad (FS), la superficie de rotura, el efecto del flujo de agua subterránea con la elaboración de las líneas de flujo y equipotenciales. Todo esto bajo un análisis por etapas, comprendido por una primera etapa un análisis estático y la segunda con análisis dinámico o con sismo.

El FS se calculó utilizando el método que se conoce como reducción de resistencia al cortante, basado en el criterio de rotura Mohr-Coulomb se reduce gradualmente los parámetros de resistencia al corte (cohesión (C) y ángulo de fricción interna del suelo (ϕ)) provocando la falla inicial y finalmente la falla global.

El análisis sísmico, se realizó en análisis dinámico en dos dimensiones y se utilizó la teoría de la elasticidad. En el análisis dinámico es importante los parámetros de amortiguamiento o disipación de la energía sísmica. Para esta investigación se utilizó para disipar las ondas de tensión la opción de condiciones de contorno con el criterio de falla Mohr-Coulomb, los valores de coeficientes de relajación para absorción de ondas se tomaron de las recomendaciones del programa, $C_1=1$ y $C_2=0,25$.

Con el fin de reducir la influencia de las condiciones de contorno al mínimo, se establecieron límites geométricos suficientemente grandes o lejanos al modelo, con la finalidad de disipar los componentes normal y cortante de las ondas y no se produzca rebote de las mismas.

La velocidad de onda primaria o de presión (V_p) y secundaria o de corte (V_s) son determinadas y establecidas por el programa, utilizando los

parámetros del suelo (E , ν y γ) de cada perfil.

La carga dinámica oscilatoria (cíclica) se introdujo al programa de forma pseudoestática, como componentes de aceleración “x” y “y” expresados en términos de la aceleración normal de la gravedad “g”, controlada por los multiplicadores de carga del programa, en intervalos de aplicación de 0.1 s. Para el caso de los perfiles en estudio y la zona geográfica de ubicación estos componentes pseudoestáticos tienen un coeficiente de aceleración horizontal de 0,30 g y un coeficiente de aceleración vertical de 0,21 g, de acuerdo a la Comisión Venezolana de Normas Industriales - Edificaciones Sismorresistentes (2001) y la Fundación venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS).

En la Figura 6 se muestra el modelo del talud realizado en el programa, mostrando la condición con presencia de la obra de subdrenaje existente y el nivel freático ubicado a 3,50 m de altura.

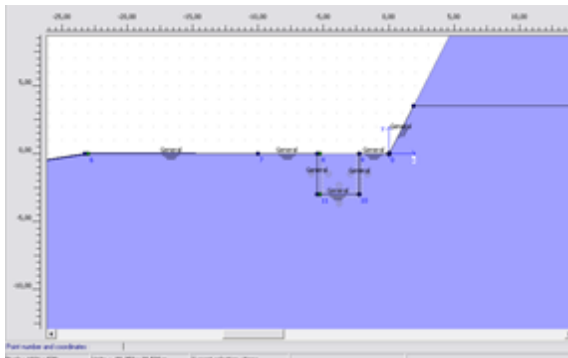


Figura 6. Sección transversal sector La González, nivel freático a 3.5 m, con presencia de subdrenaje. Imagen programa.

2.4 Aplicar el modelo presentado a la sección transversal de aplicación, con distintas ubicaciones del nivel freático

La variación del nivel freático o la presencia del subdrenaje permite evaluar el comportamiento del talud en condición desfavorable, de igual forma se puede cotejar el movimiento del flujo de agua tanto en el talud como en la calzada de la vía.

El modelo se evaluó para varias condiciones, en las etapas sin sismo y con sismo:

- Condición I, sin presencia del nivel freático ni subdrenaje
- Condición II, nivel freático ubicado a 3,50 m, sin presencia de subdrenaje.

- Condición III, nivel freático ubicado a 3,50 m, con presencia de subdrenaje.

En adelante se mostrará el proceso de evaluación de la condición III.

2.4.1 Configuración de los parámetros en estudio a través del programa

El tipo de suelo en estudio del sector La González es una Arena/Arcillosa, se introducen en el programa las propiedades elásticas y mecánicas que determinan el tipo de material.

Se procede a ingresar los parámetros requeridos por el modelo, los parámetros de rigidez son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. El programa genera automáticamente parámetros alternativos como el módulo de corte y módulo edométrico, los parámetros de resistencia del material incluyen la cohesión, el ángulo de fricción y ángulo de dilatancia y los parámetros de velocidad de desplazamiento de las ondas sísmicas en el material.

Realizada la creación del modelo, se realiza la discretización de la geometría de los elementos finitos, con el objeto de llevar a cabo los cálculos, tal como se aprecia en la Figura 7.

El programa dispone de un generador de malla totalmente automático, la generación está basada en un robusto procedimiento de triangulación, el cual da como resultado mallas no estructuradas, siendo así, su rendimiento numérico mayor a una malla regular.

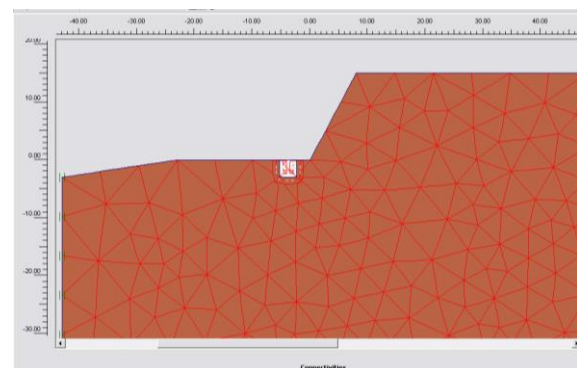


Figura 7. Discretización o mallado. Imagen programa.

Para activar las condiciones iniciales en el modelo para el análisis, se establece el peso del agua y se procede a introducir el nivel freático.

Se inicia una nueva fase de cálculo, donde se deben tener en cuenta todos los parámetros. El gráfico de deformación de la malla se muestra en la Figura 8.

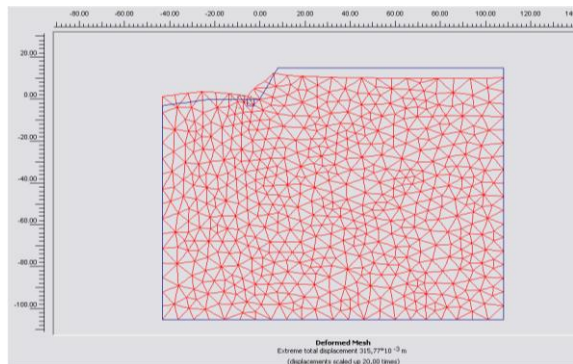


Figura 8. Deformación de malla. Imagen programa.

El programa arroja los desplazamientos horizontales y verticales máximos que se pueden presentar en el talud expresados en metros, esto basado en las condiciones iniciales dadas, como se puede observar en la Figura 9 y 10.

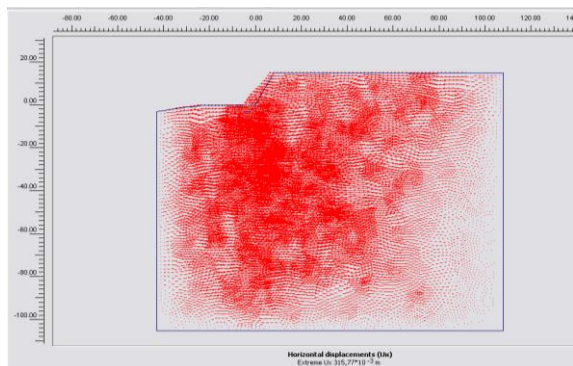


Figura 9. Desplazamiento horizontal. Imagen programa.

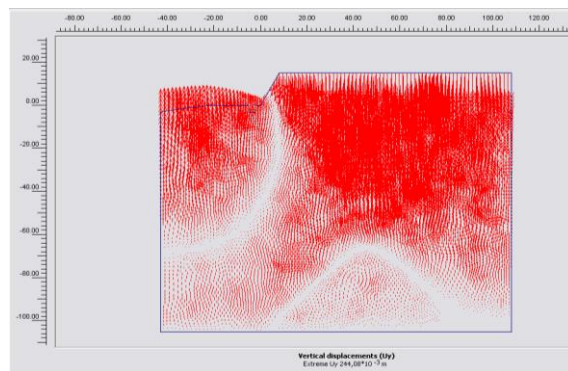


Figura 10. Desplazamiento vertical. Imagen programa.

En adelante, con los parámetros y desplazamientos establecidos, se genera la Figura 11 donde se observa claramente la superficie de rotura en espiral logarítmica, que genera el análisis de estabilidad del talud en estudio.

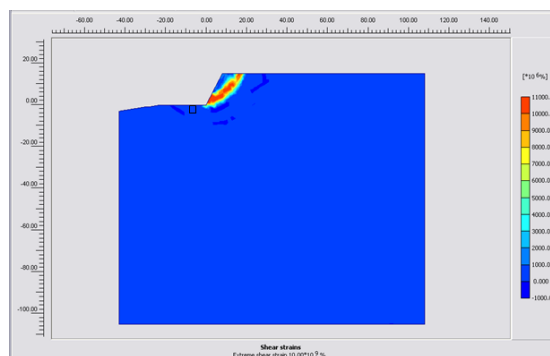


Figura 11. Superficie de rotura. Imagen programa.

De igual forma, la Figura 12 y 13 muestra las líneas de flujo y equipotenciales, generadas por el flujo subterráneo en la masa de suelo que conforma el talud y la calzada.

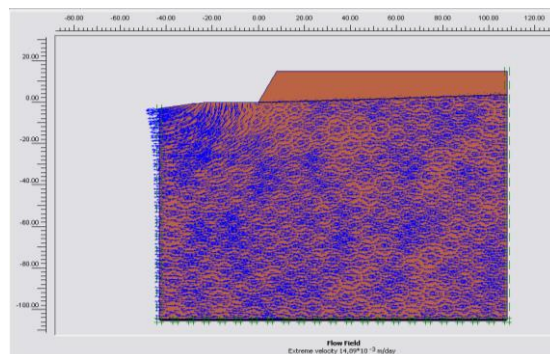


Figura 12. Líneas de flujo. Imagen programa.

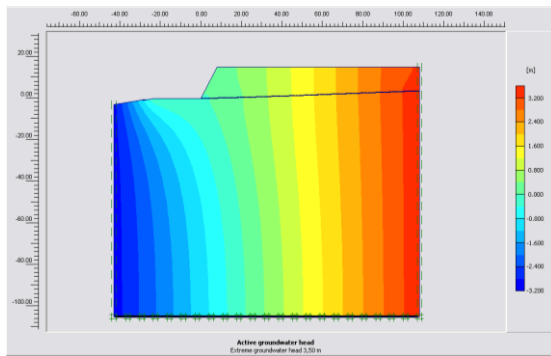


Figura 13. Líneas equipotenciales. Imagen programa.

3 Análisis de resultados

La finalidad de esta investigación es analizar la situación actual de la sección transversal real de aplicación y emplear el modelo a la sección transversal de la carretera del sector La González por medio del programa. El análisis por programas geotécnicos basados en el MEF permite establecer un control adicional en los diseños viales, para así poder determinar posibles problemas de roturas en taludes, proporcionando seguridad en la sección transversal de la vía.

Además, se realizó un análisis estático y dinámico para cada condición en estudio, obteniendo valores de factor de seguridad (FS), desplazamientos verticales, desplazamientos horizontales, velocidades de flujo y velocidad de desplazamiento del talud. Tal como se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la simulación del talud por medio del programa Plaxis 8.2.

Condicion	Condicion I	Condicion II	Condicion III
Talud	Sin subdrenaje	Sin subdrenaje	Con subdrenaje
Nivel freático (m)	Profundo	3,500	3,500
Desplazamiento horizontal (m)	0,2655	0,3195	0,3158
Desplazamiento vertical (m)	0,210	0,2444	0,2441
FS	1,069	1,011	1,011
Desplazamiento horizontal con sismo (m)	0,292	0,356	0,344
Desplazamiento vertical con sismo(m)	0,218	0,253	0,250
Velocidad del desplazamiento con sismo(m/día)	0,469	0,581	0,034
FS con sismo	1,073	0,981	0,981
Velocidad extrema de flujo (m/día)	0,0400	0,015	0,015

3.1 Desplazamiento horizontal

En la Figura 14, se representa el desplazamiento horizontal para las distintas condiciones analizadas.

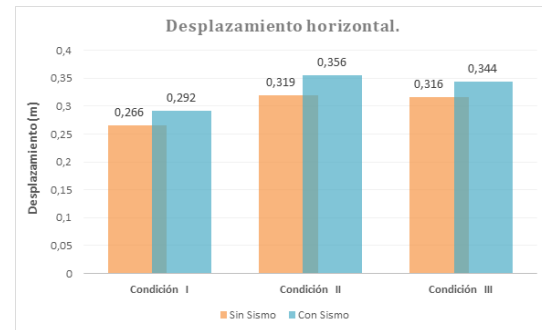


Figura 14. Desplazamiento horizontal de la sección transversal de la carretera del sector La González.

En la Figura 14 se puede observar que los desplazamientos horizontales son mayores en la condición II, esto debido a la ausencia del subdrenaje. Por lo consiguiente en la condición III con subdrenaje, se logra disminuir el desplazamiento en un 0.9% en condiciones estáticas y 3.4% en condiciones sísmicas.

De igual forma, en la condición I cuando se tiene un nivel freático profundo se aprecia como estos desplazamientos son mucho menores a las otras dos condiciones, teniendo como resultado, un aumento del desplazamiento de un 19.9% en la condición II y 18.8% en la condición III en el análisis estático, y para el análisis sísmico un 21.9% en la condición II y 17.8% en la condición III, estos comparados con los desplazamientos de la condición I.

3.2 Desplazamiento vertical

Los resultados obtenidos se representan en la Figura 15, donde se observa que la condición II con ausencia de subdrenaje y la condición III con presencia de subdrenaje, tienen desplazamientos similares tanto para el análisis dinámico y análisis estático, de igual forma se puede verificar que es menor el desplazamiento en la condición I respecto a las demás.

Por otro lado, hay un incremento del desplazamiento del 16.2% sin sismo y de un 15.4% con sismo de la condición I respecto a la condición

II y III. Además, los desplazamientos verticales son menores comparados con los desplazamientos horizontales. Esto demuestra la influencia del nivel freático en los desplazamientos.

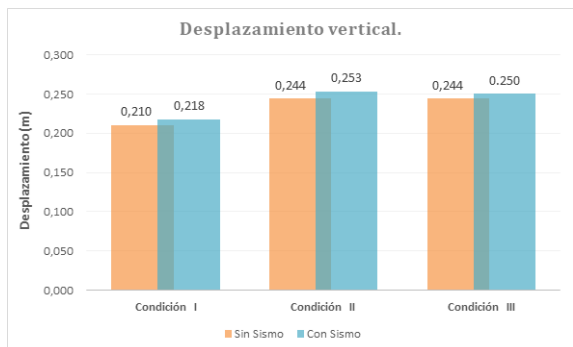


Figura 15. Desplazamiento vertical de la sección transversal de la carretera del sector La González.

3.3 Factor de seguridad

La Figura 16, muestra como en las condiciones II y III los factores de seguridad son iguales para situaciones dinámicas y estáticas, al mismo tiempo se puede constatar que la presencia del subdrenaje no incide en el factor de seguridad. Asimismo, los valores obtenidos al ser comparados con la Tabla 3 en el análisis estático, indican que se tiene una seguridad cuestionable y en el análisis dinámico para valores menores a uno se encuentra en condición insegura.

Sin embargo, para la condición I sin subdrenaje y un nivel freático profundo, se obtienen los factores de seguridad más grandes cotejados con las otras condiciones, donde se puede contabilizar un aumento de 5.7% sin sismo y 9.4% con sismo, respecto a la condición II y III. Esto indica la influencia de la presencia de agua en la estabilidad.

Tabla 3. Recomendaciones para factores de seguridad críticos según Sowers y Sowers, 1970

Rango del FS en taludes (Sowers y Sowers, 1970)	
FS	Significado
< 1	Inseguro
1 – 1.20	Seguridad cuestionable
1.30 – 1.40	Satisfactorio para: Corte y Terraplenes
> 1.50	Seguro para presas

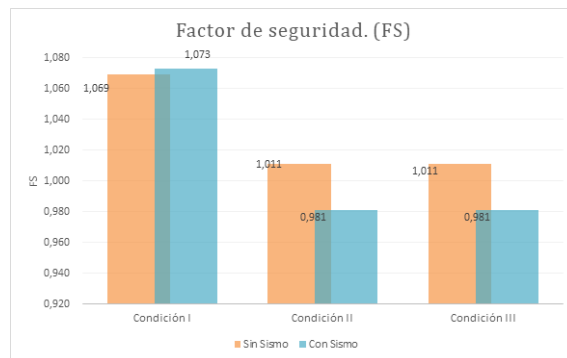


Figura 16. Factor de seguridad de la sección transversal de la carretera del sector La González.

3.4 Velocidad de desplazamiento con sismo

La velocidad de desplazamiento del talud se analizó bajo la acción del sismo, se puede observar en la Figura 17, donde la condición II tiene la mayor velocidad y se incrementa un 23.8% respecto a la condición I, esto debido a la presencia del nivel freático (3.50 m). Mientras que la condición III disminuye un 94.1% respecto a la condición II, debido a la presencia del subdrenaje.

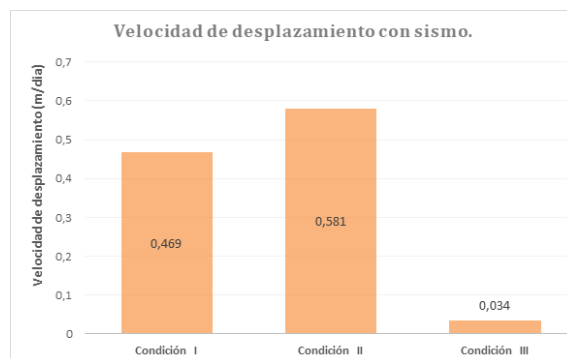


Figura 17. Velocidad de desplazamiento con sismo de la sección transversal de la carretera del sector La González.

4 Conclusiones

Al analizar los resultados obtenidos mediante el programa y comparando las tres condiciones en estudio, queda demostrado como el flujo de agua subterráneo a pesar de la presencia del subdrenaje afecta la calzada de la carretera del sector La González.

4.1 Desplazamiento horizontal

Tomando en cuenta la condición I (nivel freático profundo y ausencia del subdrenaje) como condición patrón demuestra que las condiciones II y III tienen desplazamientos mayores siendo afectadas directamente por la presencia del nivel freático a 3,50 m.

La existencia del subdrenaje no disminuye el desplazamiento horizontal de forma significativa, es decir, el subdrenaje no está funcionando de manera correcta, debido a que no recolecta el agua subterránea necesaria para evitar el desplazamiento en la calzada.

La acción en condiciones dinámicas aumenta el desplazamiento, pero comparado en condiciones estáticas la variación es pequeña, asimismo la existencia del subdrenaje disminuye minimamente el desplazamiento.

4.2 Desplazamiento vertical

La construcción de un subdrenaje influye directamente en el desplazamiento vertical, cuando el nivel freático no se considera (nivel profundo, Condición I) los movimientos son menores, pero cuando el nivel freático cambia (Condición II y III), los desplazamientos aumentan, a pesar de la presencia del subdrenaje, lo que demuestra que no está funcionando de manera eficiente.

El análisis dinámico y estático de la condición II y III son similares, esto debido que la usencia o presencia del subdrenaje no es muy relevante.

4.3 Factor de seguridad

El factor de seguridad arrojado para cada condición demuestra que el talud es inestable, pues se obtienen FS menores a 1. Además, con el estudio realizado mediante el programa queda demostrado que, en taludes de material suelo la superficie de rotura no tiene la forma circular como se ha venido tratando históricamente para simplificación del problema.

La usencia o presencia del subdrenaje no afecta directamente el factor de seguridad, pues este se mantiene constante en las condiciones II y III, ya que este no se encuentra en el cuerpo del talud.

Agentes como el agua afectan la resistencia al corte del suelo, disminuyendo su presión efectiva,

capacidad de soporte y aumentando su deformación, provocando inestabilidad en el talud del sector de La González. Además, el factor de seguridad obtenido es inferior o igual a uno.

4.4 Velocidad de desplazamiento con sismo

La presencia de un subdrenaje disminuye la velocidad de desplazamiento considerablemente, las condiciones I y II poseen velocidades mayores cuando no existe presencia del subdrenaje.

Para finalizar, la posición del nivel freático afecta la calzada siendo el principal factor responsable en el desplazamiento tanto en horizontal como vertical. De igual forma, el agua subterránea infiltra debajo de la calzada provocando el movimiento y deformación de la misma, puesto que, el subdrenaje no funciona de manera adecuada.

Asimismo, el agua que satura el material del talud afecta su estabilidad.

La deformación de la calzada y la inestabilidad del talud, son factores que afectan el funcionamiento, comodidad y seguridad de los usuarios.

Recomendaciones

Como resultado a las conclusiones anteriormente descritas, se describen las posibles recomendaciones:

- La geometría del talud es un factor importante que influye en la estabilidad, el cambio en el ángulo de inclinación o reducción de la altura permite disminuir los esfuerzos a los cuales está sometido, esto se podría lograr mediante terracedo localizado o descabezado del talud.
- La implementación de un sistema de drenajes horizontales o de penetración, permite disminuir el nivel freático, puesto que, quedó demostrado que el agua es el principal causante de la inestabilidad del talud y afectación de la calzada del sector La González.
- La aplicación de un sistema de drenajes transversales o interceptores, en la corona y en la cara del talud puede disminuir la infiltración de agua y la erosión. De igual forma, se debe construir un drenaje a pie del talud (cuneta) para recolectar las aguas provenientes de la parte superior y de otros drenajes.
- Aumentar la profundidad del subdrenaje existente en la sección de carretera del sector La González, para lograr mejor recolección del agua y disminuir los asentamientos del material por el

lavado de fino.


- Impermeabilizar los depósitos de agua para riego de caña existente en la terraza superior del talud (vía que conduce a la población de San Juan), para disminuir la infiltración y el nivel freático.
- Estudiar un nuevo trazado para este tramo de vía, ya que por ser el movimiento de masa lento pero idetenible por acción del megadeslizamiento, cualquier medida es paleatoria y de emergencia para mantener el paso, pero para nada es definitiva.


Referencias


- Andueza, P. (1999). Diseño geométrico de carreteras. Merida, Venezuela. Universidad de Los Andes – Venezuela.
- Briceño, J., Belandria, N., León, F. (2022). Ubicación y profundidad de la grieta de tracción en taludes con el empleo de modelos numéricos. Artículo de Investigación. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería*. Universidad del Zulia Venezuela. 45(2). doi: <https://doi.org/10.22209/rt.v45n2a04>.
- Briceño, J., Villa, J., Gómez, C., Belandria, N., León F., & Verjel, V. (2021). Análisis comparativo de estabilidad en taludes utilizando métodos comprobados y modelos numéricos de simulación. *Revista Ciencias e Ingeniería*. Universidad de Los Andes, Venezuela. 42(1), 63-70, ISSN 1316-7081, ISSN Elect. 2244-8780. Diciembre – Marzo 2021. <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/16646>.
- Ponce, V. (2018). Manual de drenaje de carreteras.
- Sánchez, F. (1997). Análisis de estabilidad de taludes. Bogotá, Colombia. Universidad de Los Andes.
- Sowers & Sowers (1970). Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones.
- Valiente, R., Sobrecases, M., & Díaz, A. (2015). Estabilidad de taludes: Conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo. *Revista CIVILIZATE*, 50-54.

Recibido: 08 de febrero de 2023


Aceptado: 20 de junio de 2023

Johannes Enrique Briceño Balza: Doctor en Ciencias Aplicadas, Magister en Ingeniería Vial, Ingeniero Civil. Profesor Agregado investigador de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela, Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Mérida Venezuela. Correo electrónico: ingjebb@gmail.com, johannes@ula.ve
 <https://orcid.org/0000-0002-1265-8788>.

Belandria, Norly: Ingeniero Geólogo. Magister en Matemática aplicada a la ingeniería. Doctora en Ciencias Aplicadas. Coordinadora del grupo de investigación en Geología Aplicada (GIGA). Profesor Agregado e investigadora de la Universidad de los Andes, Mérida Venezuela. Correo electrónico: norlyb@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-9485-0860>.

Francisco León Oviedo: Ingeniero Mecánico, ULA. PhD in Mechanical Engineering University of South Florida (USF), Tampa, FL, USA. Investigador y Profesor de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: fleon@ula.ve
 <https://orcid.org/0000-0001-7706-5740>.

Davielys Rivero: Ingeniero Civil, Egresado de la Universidad de los Andes, Mérida Venezuela. Correo electrónico: d.andreina.rivero.s@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0007-5546-555X>

Carlos Ortega: Ingeniero Civil, Egresado de la Universidad de los Andes, Mérida Venezuela. Correo electrónico: eduardoc.ortegas@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-4387-0861>

