

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TALUD EN MACIZO ROCOSO HACIENDO USO DEL CRITERIO DE ROTURA NO LINEAL DE HOEK & BROWN CONSIDERANDO UN MECANISMO DE FALLA NO CIRCULAR DE UNA AUTOPISTA EN EL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO

García S. FRANCISCO (1), De La Rosa H. ADRIANA

(1) Departamento de Geotecnia
Tecnología y Sistemas, S.A.
francisco_50@hotmail.com

(2) Departamento de Geología y Exploración
Tecnología y Sistemas, S.A.
Adrianadelar1@hotmail.com

RESUMEN

Dentro de los problemas que se presentan en la estabilidad de taludes en macizos rocosos considerando la hipótesis de que presentan mecanismos de fallas circular, son que dentro de su solución consideran el criterio de rotura lineal de Mohr – Coulomb, y en ciertos casos el criterio empírico de rotura no lineal de Hoek & Brown; generalmente anteponiendo la ley de fluencia asociada. Otra de las problemáticas presentes en el tema de estabilidad de taludes, es el definir un Factor de Seguridad (FS), que usualmente se obtiene a través de un método determinístico; en donde los modelos considerados, toman en cuenta aquellos factores que afectan directamente a la estabilidad, siendo estos, la geometría del talud, las condiciones y parámetros geológicos, las cargas dinámicas como el coeficiente sísmico y la presencia del flujo de agua. Sin embargo, es importante mencionar este valor de factor de seguridad queda sobreestimado cuando se hace uso de la hipótesis de la ley de fluencia asociada tanto bajo un criterio de rotura lineal, como bajo un criterio de rotura no lineal.

Por lo anterior, en este trabajo se hace la evaluación de la estabilidad del talud considerando diferentes pendientes, así como bermas para disminuir el potencial círculo de falla e incluso la determinación de soporte mediante anclajes de fricción. En esta investigación se presentan los resultados de pruebas de laboratorio llevadas a cabo en finalidad de establecer diferencias entre sus comportamientos.

Finalmente, a través del uso de modelos numéricos, enfocados a reproducir los desplazamientos del macizo rocoso, se presenta gráficamente la variación de las deformaciones obtenidas a partir de cada una de las propuestas de estabilización planteadas; permitiéndonos con ello el generar las conclusiones generales y particulares del caso expuesto.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de infraestructura carretera representa un eje vertical en el desarrollo de la sociedad, se presenta como un recurso imprescindible para la economía y el bienestar social. Los cortes

carreteros que forman parte de esta infraestructura, así como los análisis de estabilidad toman una importancia de primer orden en las obras ingenieriles. Los factores asociados a la inestabilidad de cortes carreteros son: la geometría del corte, la geomorfología local y regional, la litología y las propiedades de esta, las estructuras, las características de las discontinuidades Ref. [7].

Previo a la etapa de construcción de la autopista en estudio, se ejecutó una campaña para la revisión y evaluación de la estabilidad de todos los taludes que lo conforman Ref. [4], en donde resalto la relevancia de la existencia del mecanismo de falla de tipo Circular y No Circular que varios cortes presentaron, este último por las características y condiciones de los materiales, principalmente del macizo rocoso; presentándose la problemática en la determinación de los parámetros de resistencia.

La funcionalidad de los criterios o modelos constitutivos existentes dentro de la Geotecnia y que son aplicables en campo, dentro de ellos los empleados en este trabajo; Barton y Bandis, y Hoek-Brown, fueron los que mejor se adecuaron a las solicitudes exigidas para la simulación de las condiciones reales del corte, presentándose las mejores aproximaciones de resultados en cada uno de los criterios utilizados.

2. GENERALIDADES DEL SITIO Y DEL PROYECTO

2.1. ANTECEDENTES

El estado de Oaxaca, al sureste de la República Mexicana con 93,952 Km² de superficie Ref. [10] ocupa el quinto lugar respecto a su extensión territorial, es uno de los estados con mayor actividad turística y comercial, esta última relacionada en gran medida por la presencia de puertos comerciales como el de Salina Cruz.

La construcción de la Autopista Mitla-Tehuantepec inició en 1999, proyectada con 288 kilómetros que unirán la Ciudad de Oaxaca capital con el Istmo de Tehuantepec y el puerto de Salina Cruz, reduciendo a la mitad el tiempo de traslado entre ambos puntos. La Autopista se encuentra sobre el margen del Río Tehuantepec que consta de 240 km de longitud. En el tramo Santa María Albarradas-Santiago Lachiguiri que se encuentra actualmente en construcción se han detectado cortes con susceptibilidad a falla que requieren un análisis de estabilidad para dictaminar los tratamientos necesarios para el correcto funcionamiento de la Autopista.

2.2. LOCALIZACIÓN DEL SITIO

La zona de estudio se ubica al sureste del estado de Oaxaca, en las coordenadas 16°42'36.99"N, 95°41'53.71"O a 371 m.s.n.m., dentro del municipio de Nejapa de Madero, entre las poblaciones de Agua Blanca y San Juan Lachixila. Ver Fig. 1.

Se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur que se extiende desde Punta Mita en Nayarit hasta el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca, es considerada la región más compleja y menos conocida de México, debido a que sus rasgos son consecuencia de la interacción de la Placa Norteamericana con la Placa de Cocos Ref. [6]. De la misma manera corresponde a la subprovincia de Sierras Orientales que conforma los estados de Puebla, Veracruz, hasta las proximidades de Santo Domingo Tehuantepec en Oaxaca. Ref. [11], la parte sur de esta subprovincia está orientada en conformidad con los lineamientos principales de la Sierra Madre del Sur. Ver Fig. 2.

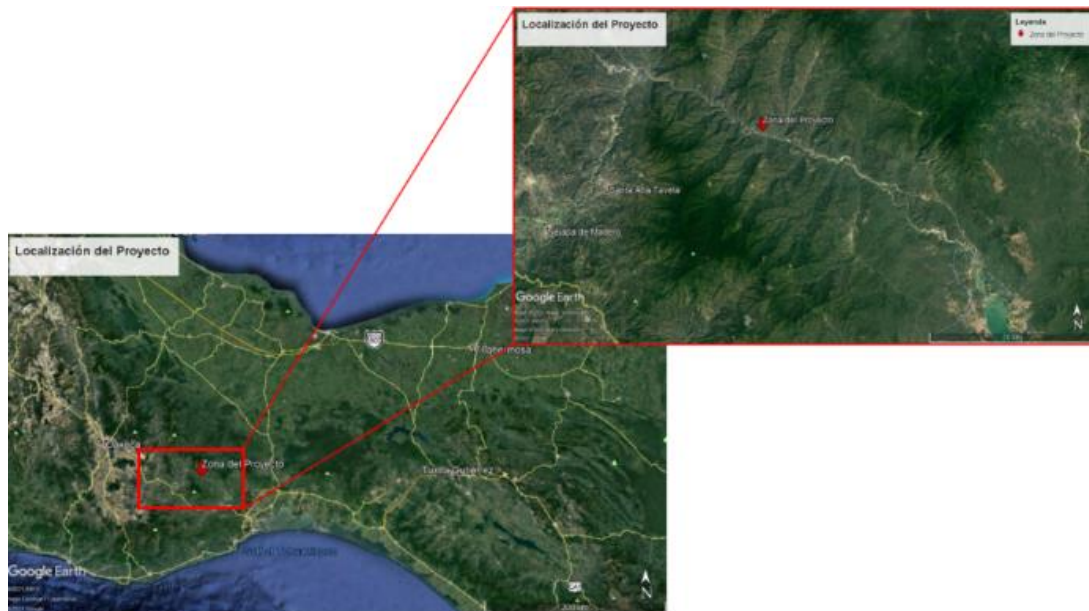


Figura 1. Localización del proyecto.

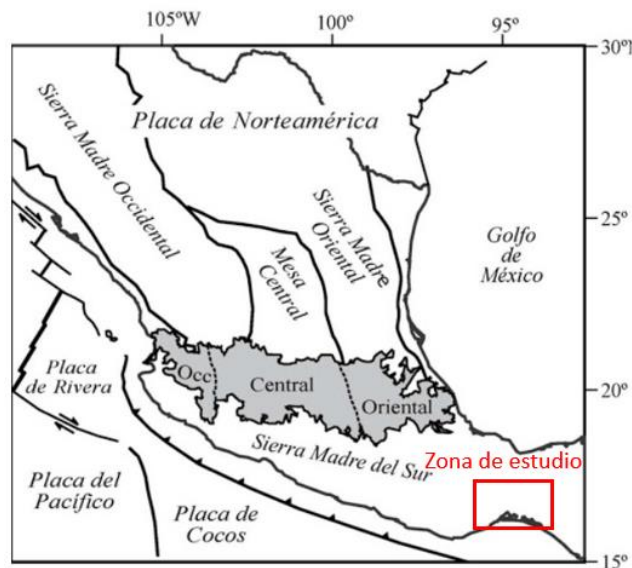


Figura 2. Características fisiográficas de la zona de estudio.

2.3. CARACTERÍSTICAS DEL CORTE

El corte tiene una longitud de 260 m, del Km 149+860 al Km 150+100, presenta una altura máxima de 50 m aproximadamente en el cadenamiento del Km 149+920, la inclinación del corte en la sección de proyecto no objetada corresponde a 63° , a partir del Km 149+950 el corte tiene un cambio de altura donde el promedio es de 10 m a 12 m. Ver Fig. 3.

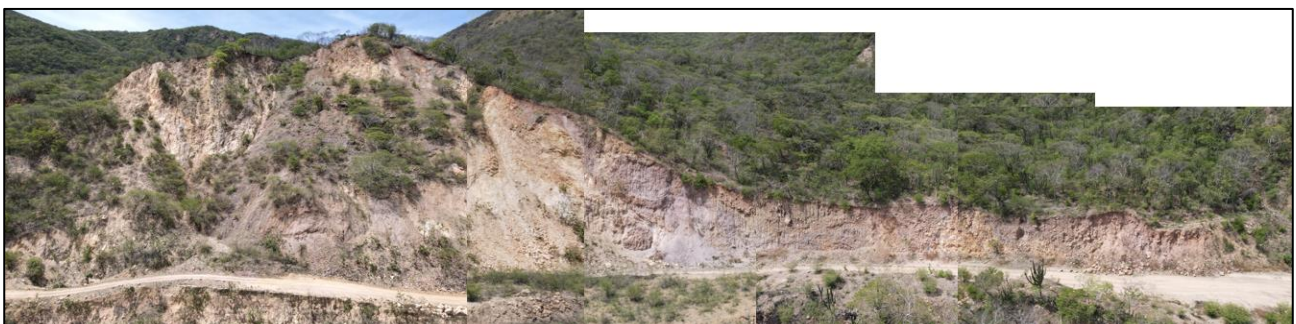


Figura 3. Mosaico del corte en estudio.

3. GEOLOGÍA

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La geología representativa del área de estudio se caracteriza principalmente por un evento volcánico y otro magmático; el primero consiste, de manera particular, en depósitos piroclásticos riolítico-andesíticos de toba andesítica-dacítica, andesita, brecha volcánica y caliza lacustre de la Formación Laollaga, distribuida en porciones noroccidentales a suroccidentales Ref. [17] como lo ilustra la Fig. 4. El evento magmático consiste en cuerpos intrusivos de composición granítica y granodiorítica, expuestos en porciones noroccidentales a suroccidentales, occidentales y en el sur, igualmente, consiste en pórfidos dacíticos, andesíticos y cuarzolíticos del Mioceno, que afloran en pequeños cuerpos semicirculares, esta litología se encuentra de manera predominante en el área de estudio Ref. [18].

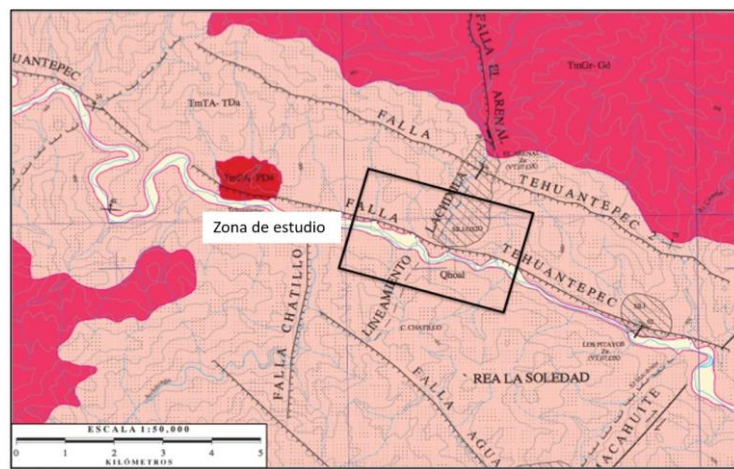


Figura 4. Mapa geológico de la zona de estudio.

3.2 GEOLOGÍA LOCAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona en la cual se encuentra situado el corte está conformada por la Formación Laollaga, se observa un macizo rocoso de origen ígneo, composición andesítica y textura porfídica, presenta zonas con un alto grado de fracturamiento y zonas donde se presenta con una estructura predominantemente masiva. La unidad que le sobre yace corresponde a un depósito compuesto por suelo residual que contiene fragmentos de la roca madre y una matriz arenosa. Ver Fig. 5.



Figura 5. Delimitación geológica de la zona de estudio.

El levantamiento geológico de campo reflejó la alta susceptibilidad a falla rotacional; el material derrumbado al pie del corte alcanzó registros de hasta 6 metros de altura promedio por 3 metros de

profundidad. La calidad del macizo rocoso es mala predominantemente en la zona de mayor altura donde se encuentra la Andesita altamente alterada a suelo residual. Ver Fig. 6.



Figura 6. Zona altamente susceptible a falla.

4. DATOS GEOTÉCNICOS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LOS ANÁLISIS O MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO-GEOTÉCNICO

Con la finalidad de realizar un modelo geológico-geofísico-geotécnico se realizaron estudios de exploración geofísica que alcanzaron profundidades máximas de prospección del orden de 20 a 30 m en los tendidos sobre la corona del talud y entre 9 a 15 m en la cara del talud; se realizaron cuatro tendidos TRS para obtener información en el sitio de estudio. La interpretación se realizó a través de gráficas en donde se analizan los contrastes de velocidad sísmica aparentes, las cuales corresponden a las condiciones naturales de los materiales del subsuelo, posteriormente se obtuvieron las velocidades reales y los espesores de cada una de las capas detectadas para formar un modelo Geosísmico del sitio Ref. [12]. Ver Fig. 7.

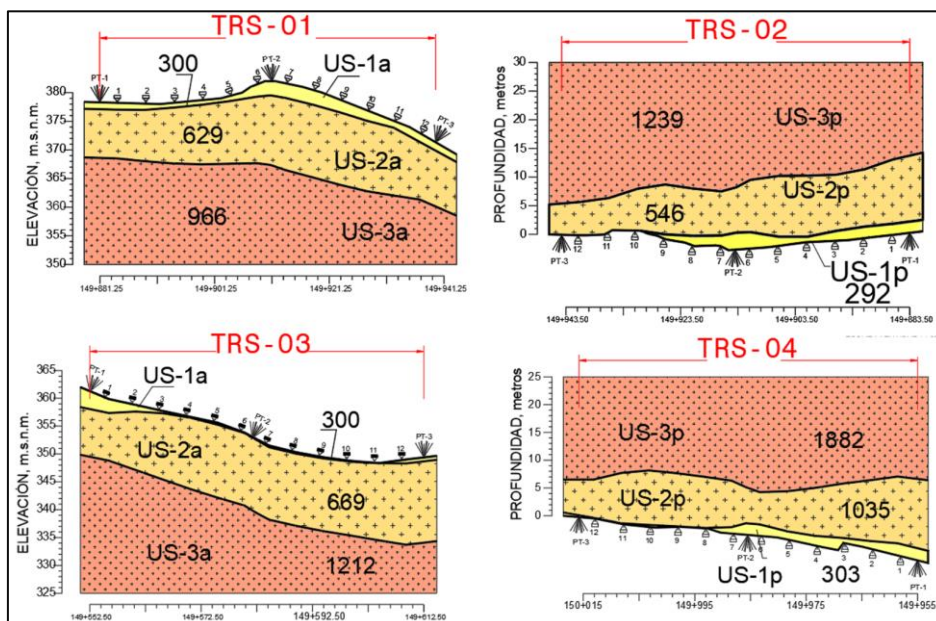


Figura 7. Secciones de los TRS en la corona del corte (TRS-23, TRS-25), sobre la cara del corte (TRS-24, TRS-26).

El TRS-23 se colocó en la zona con mayor susceptibilidad a falla, dicho tendido arrojó valores que confirman la existencia de material relajado a lo largo del corte, de la misma manera, como se puede observar de las secciones, las velocidades sísmicas corresponden a materiales muy alterados, dato que se tomará en consideración para la propuesta de estabilización del corte. Adicional a los estudios previamente comentados, se realizaron estudios de fotogeología Ref. [19], donde se observa la geomorfología de la zona del corte; como lo ilustra la Figura 8, la zona presenta fallas circulares previas, de la misma manera se observan rasgos de posibles fallas próximas.

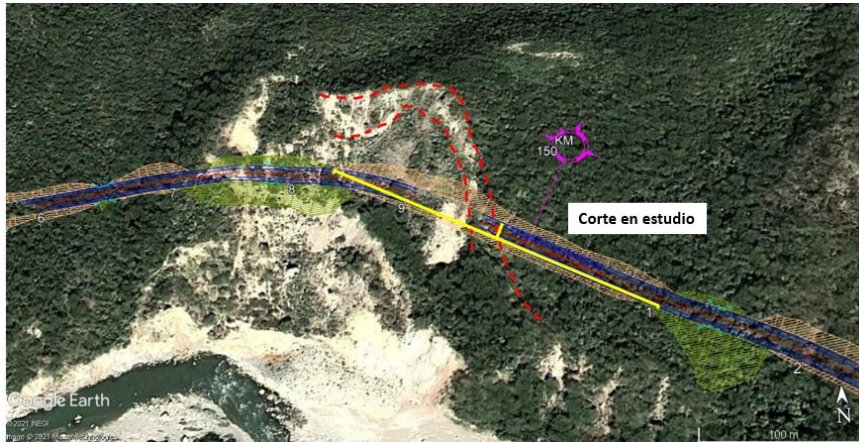


Figura 8. Fotogeología del corte. Se observa el corte (amarillo) y la susceptibilidad a falla rotacional (rojo).

5. ANÁLISIS Y ESTABILIDAD DEL TALUD, DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD

Para determinar los factores de seguridad de estabilidad del talud en condiciones actuales se realizaron análisis de resistencia al esfuerzo cortante (falla rotacional) y análisis estructural.

5.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

A partir de un análisis estereográfico y de las observaciones físicas realizadas in situ para verificar las condiciones de alteración y las características de las discontinuidades, se verificó el potencial mecanismo de falla que pudiera presentarse en el talud, principalmente en las zonas de afloramiento del macizo rocoso alterado. En el estereograma se indica el rumbo azimutal de la máxima inclinación de la cara del talud y el rumbo y dirección azimutal de las discontinuidades existentes como se observa en la Figura 9.

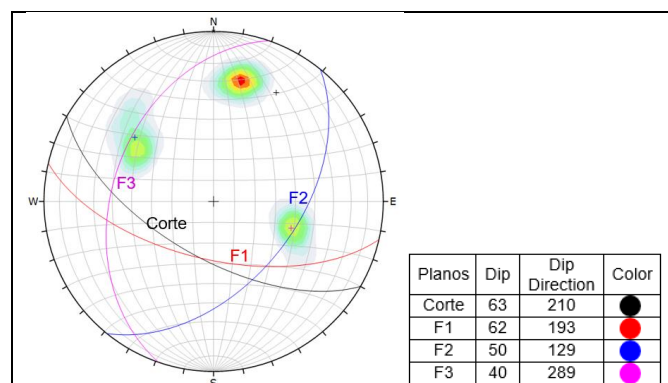


Figura 9. Estereograma del corte.

Identificados los diferentes bloques que presentaron posibilidades cinemáticas de movimiento, esto con ayuda de estereograma, se procedió a realizar el análisis en condiciones de equilibrio límite, haciendo uso del análisis cinemático por estereografía, el cual nos permite analizar la estabilidad del

terreno por deslizamiento a través de sus debilidades estructurales, ya sean fracturas, planos de estratificación, planos de flujos y fallas existentes. Con este método se analizan los modos de falla del modelo geológico que son las fallas estructurales por cuñas, volteo y planar. Para llevar a cabo este análisis, además de los datos conocidos de las orientaciones de las discontinuidades se hizo uso del ángulo de fricción estimado con el programa RocData, haciendo uso del criterio de Barton-Bandis Ref. [1]; los valores obtenidos del ángulo de fricción fueron de 45° para la andesita y de 46° para la andesita oxidada.

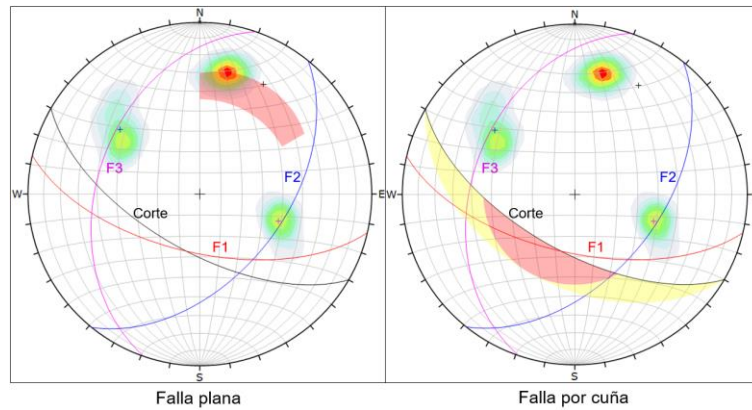


Figura 10. Análisis cinemático.

Los mecanismos más probables de falla por mecanismo estructural de falla plana pueden presentarse en la zona fracturada por un plano de deslizamiento que tiene un rumbo azimutal de dirección del echado y echado de $193^\circ/62^\circ$ el cual tiene una dirección del echado similar a la del corte. También se aprecia el mecanismo de falla en cuña formado por las combinaciones de las familias con orientación de rumbo de echado y echado de $193^\circ/62^\circ$ y $289^\circ/740^\circ$, así como las familias $129^\circ/50^\circ$ y $289^\circ/40^\circ$.

La sección de análisis fue la del Km 150+030, debido a que en este cadenamiento aflora el macizo rocoso con una altura de 12 m, aproximadamente. El dimensionamiento del bloque máximo se hizo a partir del reconocimiento en campo el cual ronda en los 0.8 m para ambos mecanismos. Para llevar a cabo los análisis pertinentes, se hizo uso de los softwares Swedge Ref. [13] y RocPlane Ref. [14] de Rocscience, versión 4.0 y 2.0 respectivamente. La Figura 11 muestra la zona del macizo rocoso, así como la geometría de los bloques analizados.

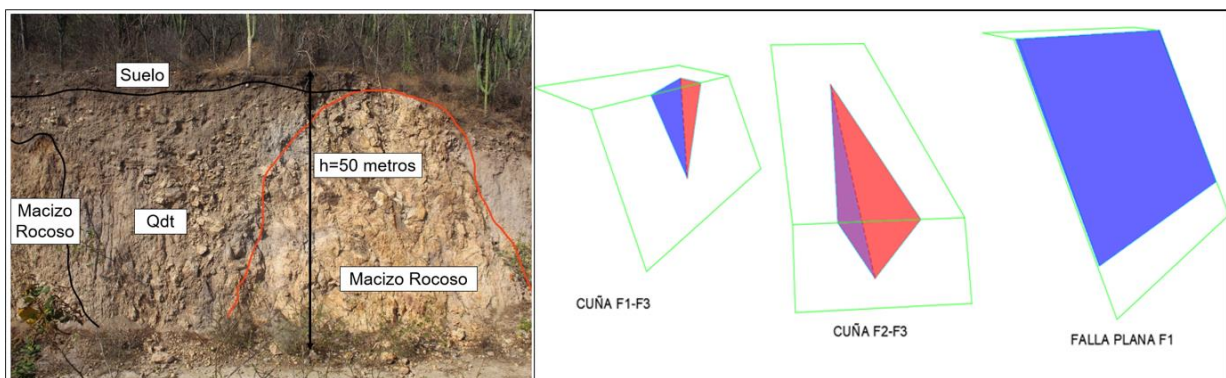


Figura 11. Zona donde aflora el macizo rocoso y la geometría de los bloques analizados por mecanismos de falla estructural.

Finalmente, las condiciones del análisis de equilibrio limite se realizaron para las condiciones estáticas, dinámicas y saturada, esta última evaluada al 50%. En la Tabla 1 se observan los resultados obtenidos.

Tipo de falla	Cara del talud	Hombro del talud	Familias	Fractura o falla		FS sin soporte		
				Familia F1	Familia F2	Estático	Dinámico	Saturado
Cuña	210°/63°	210°/5°	F1-F3	193°/62°	289°/40°	1.6	1.3	1.4
			F2-F3	129°/50°	289°/40°	8.1	4.6	7.7
Plana	210°/63°	220°/5°	F1	193°/62°		0.5	0.4	0.0

Tabla 1. Resultados del análisis por mecanismo estructural.

5.2 ANÁLISIS POR FALLA ROTACIONAL

Derivado del fracturamiento del macizo rocoso del talud, y que además se localiza una zona de depósito de talud, para realizar el análisis se consideró una masa homogénea que falla de forma rotacional circular y no circular; la primera para la zona del depósito de talud y la segunda para el macizo rocoso fracturado. Para llevar a cabo los análisis, se hizo uso del software Slide 6.0 Ref. [16], utilizando el método de Bishop simplificado para la condición estática, dinámica ($C_s = 0.13$) y saturada; además de hacer uso de la herramienta Simulated Annealing, con la condición de falla de tipo No Circular con el cual se procedió a determinar la superficie de falla correspondiente al contacto del suelo, depósito de talud, así como de la roca andesítica, calibrando a la par los parámetros Geomecánicos de ambas unidades.

Las secciones utilizadas para realizar el análisis de estabilidad corresponden a las obtenidas en el desarrollo de la geología de detalle y la exploración indirecta a través de la geofísica realizada en el sitio; estas secciones son las siguientes:

- Km 149+920, debido a que corresponde a la sección de mayor altura del corte y parte central de la zona donde se observa la existencia de Falla Rotacional.
- Km 149+960 debido a que, en esta, el depósito de talud se encuentra por debajo de la roca alterada a suelo residual, dando pie a la posibilidad de falla circular.

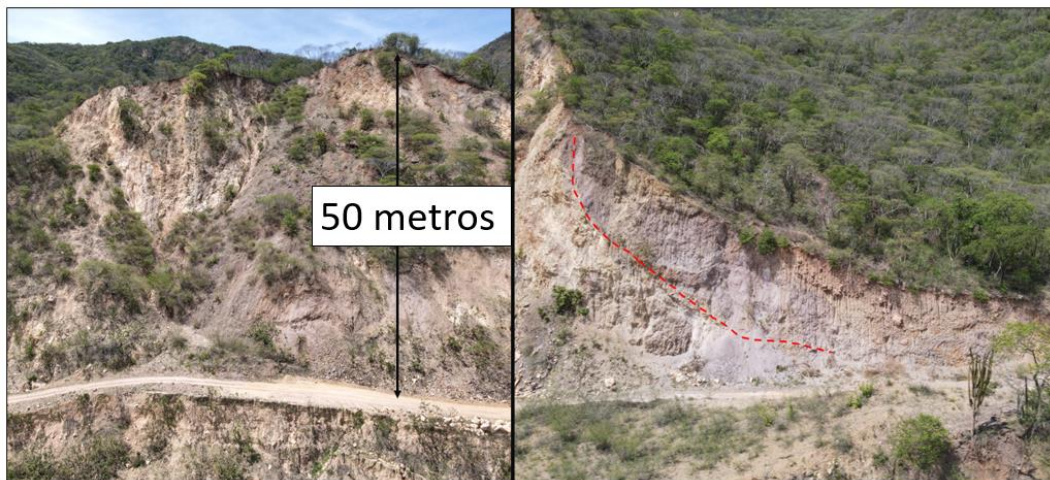


Figura 12. Zonas donde se realizó el análisis por falla rotacional.

Definido el modelo numérico y las secciones de análisis, la metodología seguida consistió en modelar ambas secciones bajo las 3 condiciones de fuerzas actuantes para obtener el factor de seguridad del talud, considerando, además, el evaluar la falla Circular desde la corona del talud hasta el pie de este. La Figura 13 muestra el análisis realizado para la determinación del factor de seguridad bajo las tres diferentes condiciones de fuerzas actuantes, estático, dinámico y saturado.

De los resultados obtenidos puede concluirse que el talud resulta ser inestable ante las condiciones estudiadas, y para las dos secciones analizadas. Tanto por los análisis realizados como por las condiciones propias de los materiales previamente consideradas y principalmente por el grado de alteración y por el tamaño de bloques, el talud presenta problemas de desprendimientos importantes de material, los cuales por su tamaño y trayectoria de impacto llegan a afectar a la vialidad como se

pudo observar en el levantamiento de campo, donde los bloques inestables llegaban al otro extremo del corte en cajón, poniendo en riesgo tanto a los usuarios como a la propia calzada. En la Tabla 2 se observan los resultados obtenidos.

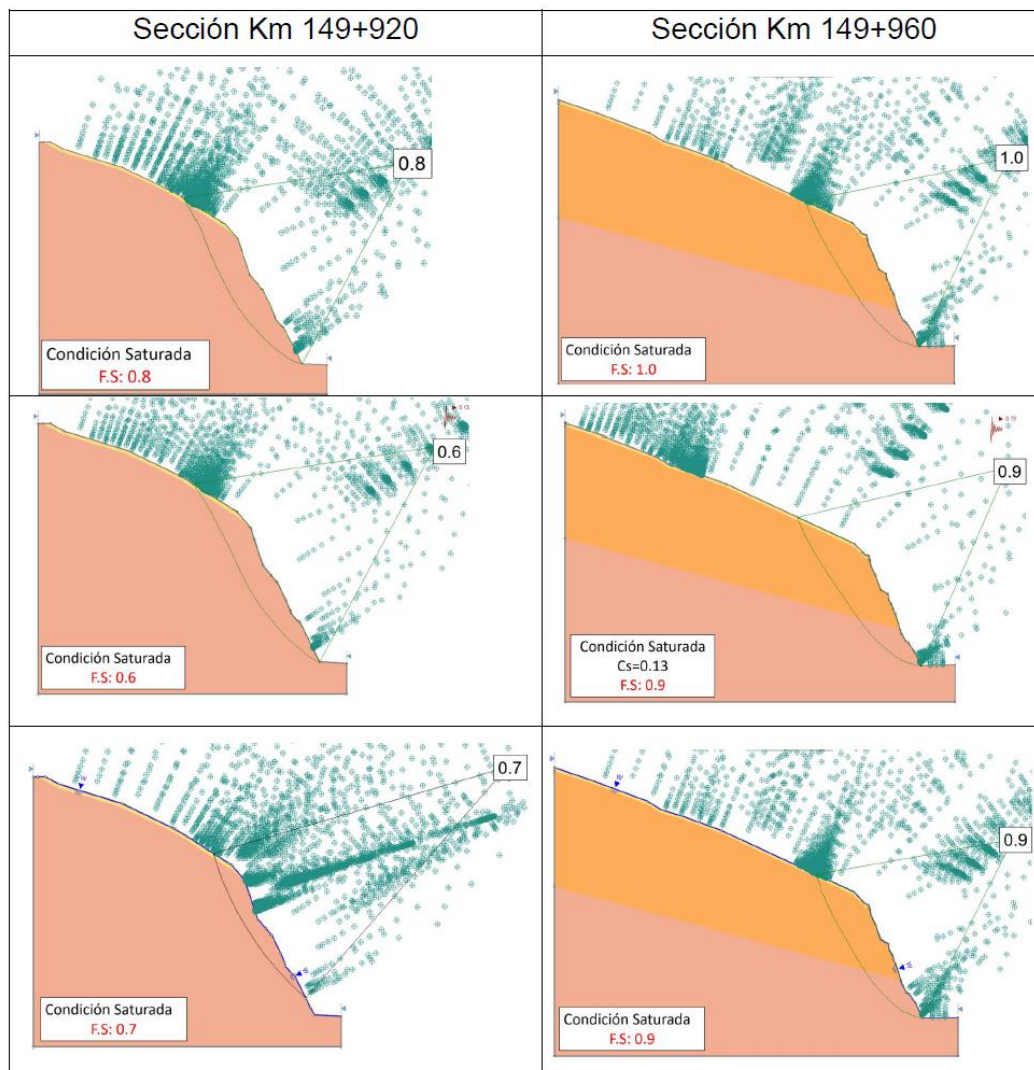


Figura 13. Análisis por mecanismo de falla rotacional para diferentes condiciones.

Sección	Ángulo del talud	Berma [m]	Factor de seguridad		
			Estático	Dinámico	Saturado
Km 149+920	63°	4	0.7	0.6	0.7
	63°	10			
	53°	4			
	53°	10			
	53°*	5*			
Km 149+960	53°*	5*	1.0	0.8	0.9

*: Adicional a la berma llevan una plataforma de 15 m

Tabla 2. Resultados del análisis por mecanismo por falla rotacional.

6. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD CONSIDERANDO ABATIMIENTO

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, el talud presenta un alto riesgo de falla derivado de la geomorfología de la zona, así como del grado de alteración de las litologías presentes. Por esta

razón se consideró una propuesta que consiste en la combinación de soluciones; en primer lugar, el abatimiento acompañado de bermas, para posteriormente incrementar su seguridad a través de anclajes.

6.1 ANÁLISIS CONSIDERANDO BERMAS

Para lograr la estabilidad del talud, se evaluaron diferentes opciones de abatimiento combinados con bermas, siendo la primera opción la pendiente del talud a 63° y la implementación de bermas de 4 metros; como segunda opción con una pendiente de 53° y bermas de 4 metros. Las siguientes Figuras muestran el análisis correspondiente para cada una de las pendientes analizadas con la determinación del factor de seguridad.

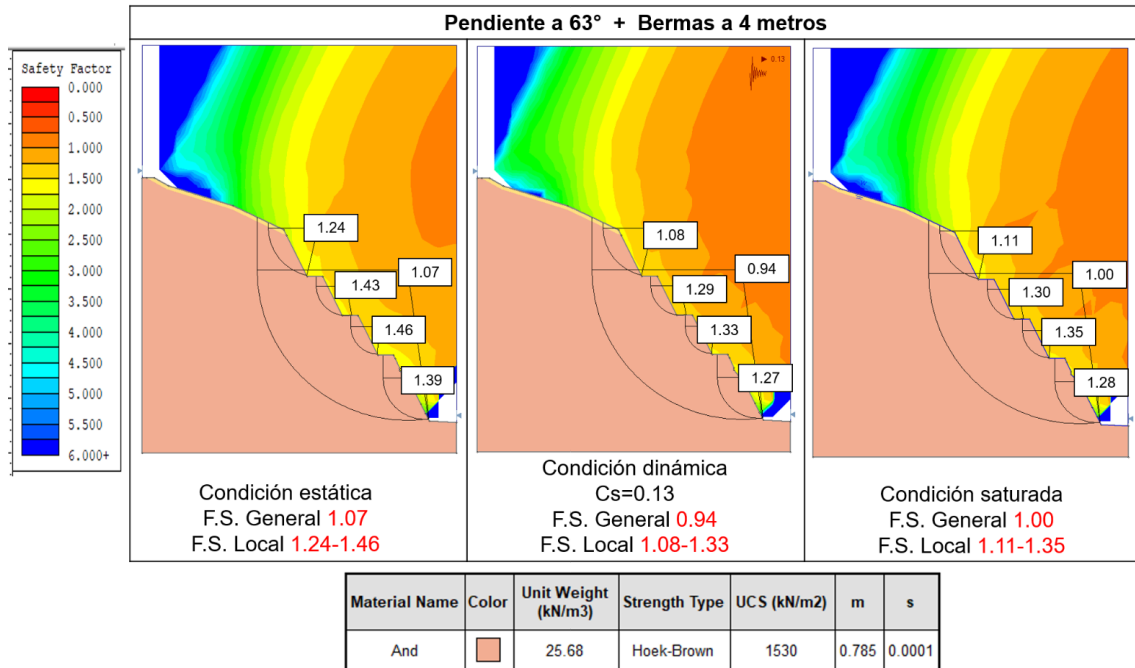


Figura 14. Falla rotacional considerando el abatimiento de 63° y bermas de 4 m bajo las condiciones de fuerzas actuantes en la sección Km 149+920.

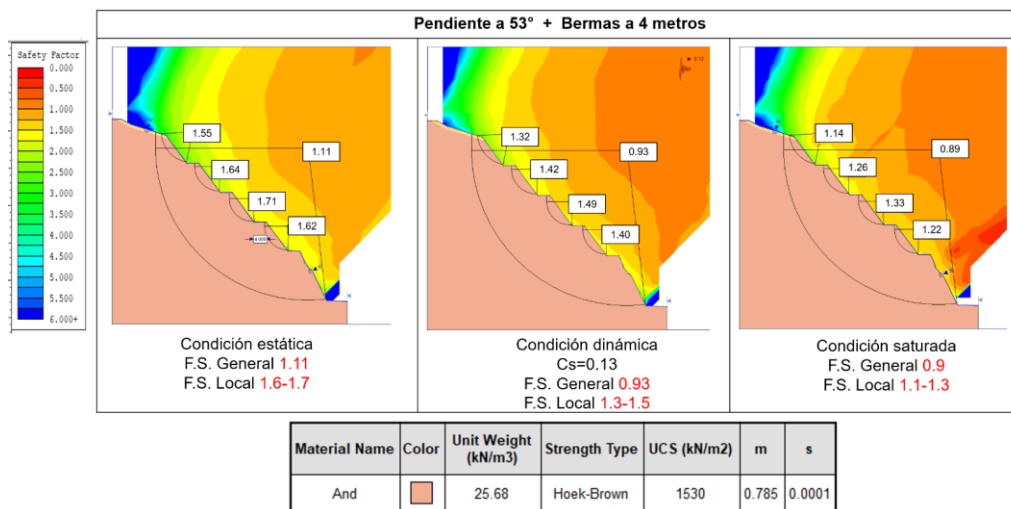


Figura 15. Falla rotacional considerando el abatimiento de 53° y bermas de 4 m bajo las condiciones de fuerzas actuantes en la sección Km 149+920.

6.2. ANÁLISIS CONSIDERANDO COMBINACIÓN DE TRATAMIENTOS

Debido al grado de inestabilidad del talud se considera la combinación de resultados por lo que también se analizó el abatimiento a 53° (0.75:1) y bermas de 5 metros con una plataforma de 15

metros. La Figura 16 muestra el análisis de estabilidad considerando abatimiento de 53° y la construcción de bermas. Como se puede observar, esta combinación de resultados incrementa considerablemente la estabilidad del talud, a pesar de ello, los F.S. se encuentran al límite de lo permitido en el caso de condición dinámica por lo que se consideró evaluar más soluciones.

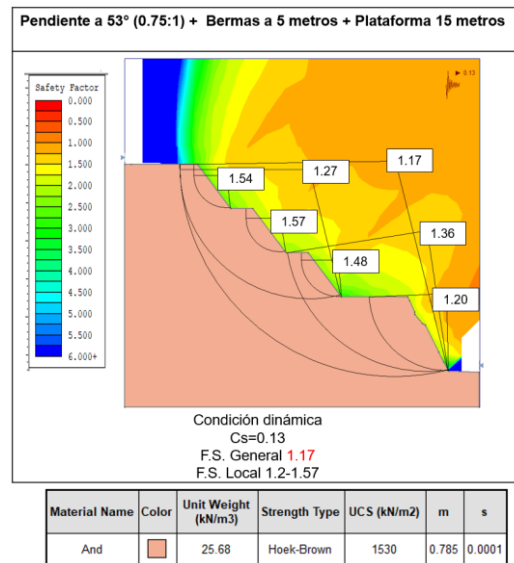


Figura 16. Falla rotacional considerando el abatimiento de 53° y bermas de 4 m con una plataforma de 15 m y bajo condiciones dinámicas (Sección Km 149+920).

Por lo anterior, se analizó la estabilidad del talud considerando el abatimiento a 53°, plataforma de 15 metros, bermas de 5 metros y soporte con anclaje; la Figura 17 muestra los resultados obtenidos.

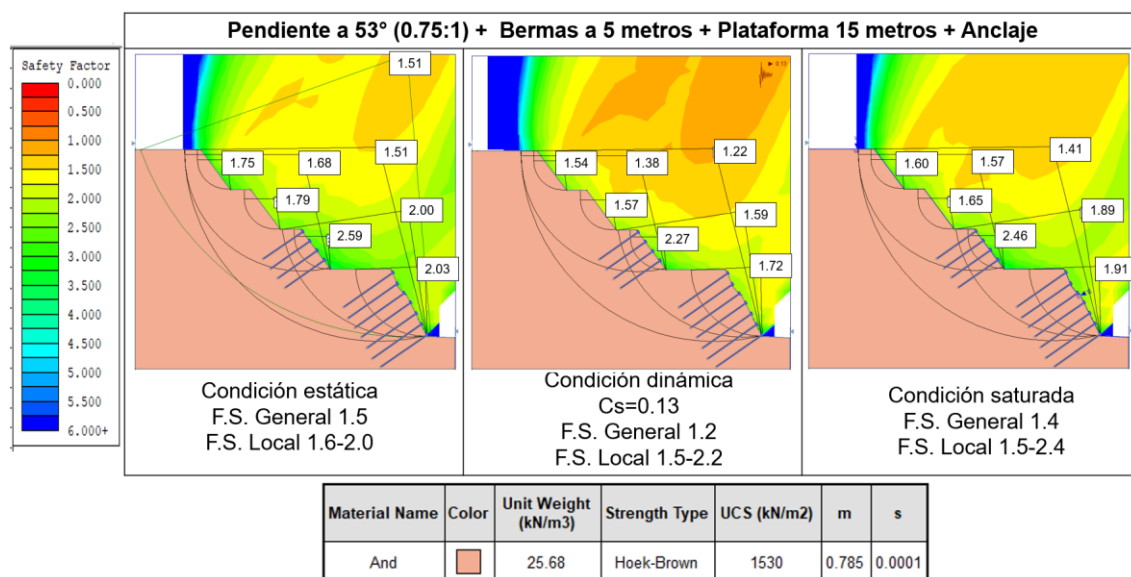


Figura 17. Falla rotacional considerando el abatimiento de 53°, bermas de 4 m, plataforma de 15 m y soporte mediante anclaje bajo las condiciones de fuerzas actuantes (Sección Km 149+920).

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos para cada una de las evaluaciones con tratamientos y soportes realizados. De las opciones de abatimientos y anchos de bermas analizadas, la mejor solución es el abatimiento a 53° con una plataforma de 15 m de ancho en la elevación 350 m.s.n.m. seguido de bancos de 10 metros de alturas con 5 metros de berma.

Posteriormente se realizará la colocación de 7 hileras de anclajes de 15 m de profundidad con patrón de 3 x 3 m (H: V), esto desde el pie del talud hasta la elevación 350 m.s.n.m., o bien, del pie del talud a la primera plataforma, seguidos de 4 hileras de anclajes de 12 metros de profundidad y mismo patrón de anclaje de 3 x 3 m (H: V) a partir de la elevación 350.5 m.s.n.m. a la 360 m.s.n.m.

Una vez propuesto el abatimiento del talud, se realizó la revisión estructural considerando el nuevo ángulo de inclinación, en el cual el bloque inestable por falla planar se logra eliminar debido a que se requiere que el ángulo de inclinación del talud sea mayor al ángulo de inclinación de la familia por analizar, condición que debido al abatimiento no se cumple. Para el caso de mecanismo de falla por cuña, los bloques aumentan su estabilidad debido a que la línea de intersección entre familias disminuye.

Sección	Pend. talud	Berma	Falla	FS con abatimiento			FS con abatimiento y soporte		
				Estático	Dinámico	Saturado	Estático	Dinámico	Saturado
Km 149+920	63°	4	Local	1.3 a 1.5	1.0 a 1.3	1.1 a 1.4			
			General	1.1	0.9	1.0			
	63°	10	Local	1.2 a 1.3	1.0 a 1.2	1.0 a 1.2			
			General	1.2	1.0	1.1			
	53°	4	Local	1.6 a 1.7	1.3 a 1.5	1.1 a 1.3			
			General	1.1	0.9	0.9			
	53°	10	Local	1.2 a 1.7	1.1 a 1.5	1.1 a 1.6			
			General	1.3	1.1	1.2			
	53°*	5*	Local	1.4 a 1.8	1.2 a 1.6	1.3 a 1.7	1.8 a 2.6	1.5 a 2.3	1.6 a 2.5
			Banco	1.5 a 1.7	1.3 a 1.4	1.4 a 1.6	1.7 a 2.0	1.4 a 1.6	1.6 a 1.9
			General	1.5	1.2	1.4	1.5	1.2	1.4
	Km 149+960	53°*	5*	Local	2.4 a 2.8	2.0 a 2.4	2.2 a 2.7		
Banco				1.8	1.5	1.6			
General				1.7	1.4	1.6			

*: Adicional a la berma llevan una plataforma de 15 m

Tabla 3. Resultados del análisis rotacional con tratamientos.

8. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS Y CON EL USO DEL SSR

8.1. GENERALIDADES

En este Capítulo se realizará el análisis para la revisión del factor de seguridad FS del talud con los parámetros de resistencia obtenidos en laboratorio. Esta revisión se hará mediante el uso del método del *Shear Strength Reduction (SSR)* y bajo el criterio de Hoek-Brown.

El método *Shear Strength Reduction (reducción de resistencia al corte)* ó *SSR* por sus siglas en inglés, es un método de análisis en donde se va reduciendo progresivamente los parámetros de resistencia al corte del material a través de un factor de reducción (FR) hasta provocar la ruptura del talud. El factor de seguridad es establecido cuando el *Strength Reduction Factor* ó *SFR* es crítico, es decir, para grandes incrementos de los desplazamientos de un punto corresponden pequeñas variaciones del SFR (Naylor, 1982). Con este método, el factor de seguridad de un talud se puede calcular con un modelo numérico, bien de elementos finitos o de diferencias finitas.

Dentro de los cálculos elastoplástico existen dos técnicas para la evaluación del grado de estabilidad del talud, la primera y de mayor uso, es la que valora la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes (método de equilibrio limite), y la segunda es en donde se mantiene fija la resistencia del terreno y se aumenta gradualmente las cargas gravitatorias hasta que se produzca la ruptura.

Sin embargo, por las condiciones y consideraciones del problema, esta técnica no es la más adecuada para poder realizar la revisión del factor de seguridad. Esto debido a que en los métodos de equilibrio límite se considera una única superficie de falla y que la ruptura se produce como un cuerpo rígido que se mueve solidariamente. Debido a esto, el factor de seguridad es el mismo a lo largo de la superficie, y además esto no garantiza que se produzca el colapso, sobre todo en los taludes de roca de gran altura.

Con el uso de los métodos esfuerzo-deformación (FEM), se define un factor reductor de la resistencia, hasta llevar al talud a una situación inestable, Ref [5].

8.2. MODELADO NUMÉRICO

Para realizar el modelado, en esta fase de análisis, se hizo uso del software *Phase2 8.0*, en donde la principal ventaja del software es el modelado de los estados de esfuerzos iniciales, en donde se consideró una relación inicial de esfuerzos 1:1, además de ser del tipo gravitacional. Adicional a ello, en esta fase de análisis se hizo uso de un modelo elástico-plástico perfecto (MEPP) para encontrar así las distintas zonas de plastificación y obtener nuestra superficie de ruptura. La etapa en donde se encontró la superficie de ruptura es aquella en donde se pasa de una situación estable definida por desplazamientos, a una situación inestable donde no se alcanzaba la convergencia.

El uso del SSR al problema para la revisión del factor de seguridad se hace debido a que por el modelo empleado (criterio de ruptura no lineal) es la que mejor define un FS frente a la ruptura.

Es importante señalar que dentro del cálculo del factor de seguridad no se consideraron condicionantes externos, tales como la infiltración, sismicidad, alteración y erosión.

8.3. DESARROLLO DEL MODELADO NUMÉRICO

Establecido todas las condiciones para el análisis, dentro de ellas las propiedades de los materiales, los resultados obtenidos del modelado muestran primeramente la etapa anterior de la formación de la superficie de ruptura (Fig. 18a) y posteriormente la figura de la etapa en donde se observa la superficie de ruptura (Fig. 18b).

A parte de presentar la superficie de ruptura, también se presenta los desplazamientos horizontales, así como los desplazamientos totales.

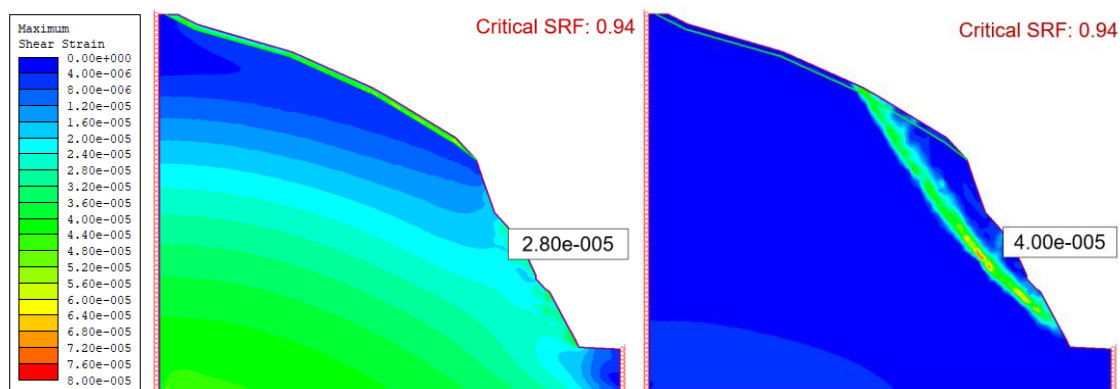


Figura 18a y 18b. Deformación por cortante antes y durante la etapa de formación de la superficie de ruptura (Sección Km 149+920).

En las Fig. 19a y Fig. 19b se observan los desplazamientos horizontales durante ambas etapas, en ella se observa la malla deformada y los vectores de desplazamientos.

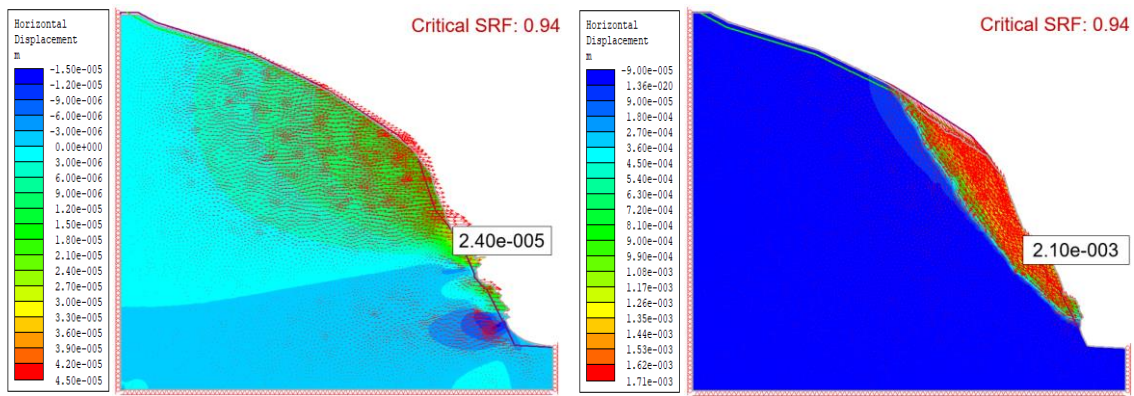


Figura 19a y 19b. Desplazamientos horizontales antes y durante la etapa de la formación de la superficie de ruptura (Sección Km 149+920).

Las Fig. 20a y Fig. 20b muestran los desplazamientos totales obtenidos durante la etapa previa a la formación de la superficie de ruptura y durante la formación de esta; al igual se muestra la malla deformada, así como los vectores de desplazamientos.

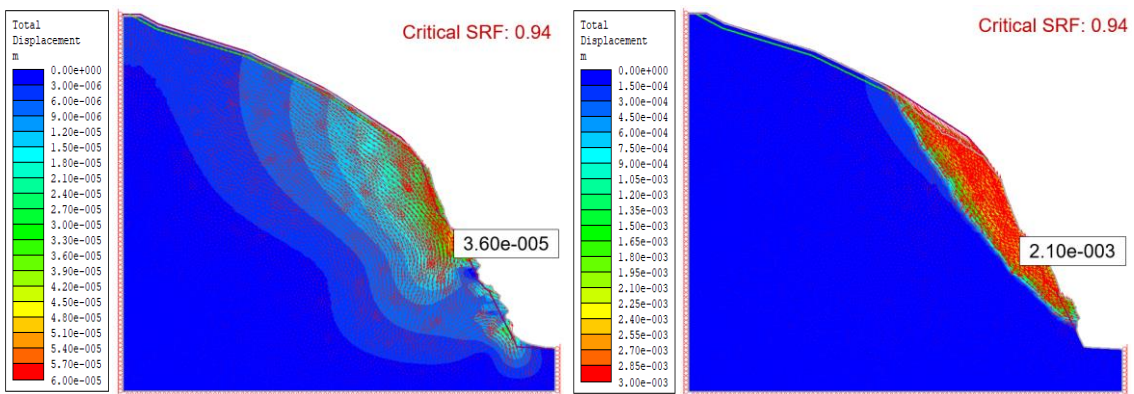


Figura 20a y 20b. Desplazamientos totales antes y durante la formación de la superficie de ruptura (Sección Km 149+920).

El *Strength Reduction Factor* usado en el talud reprodujo las condiciones de inestabilidad globales que el corte pudiera presentar, esto considerando todas las condiciones preexistentes del talud, haciendo que a diferencia del método de equilibrio limite se reprodujeran las condiciones reales de deslizamiento.

Los valores de desplazamientos horizontales y totales durante la etapa de ruptura fueron de 0.162 cm y 0.21 cm respectivamente. Finalmente, el factor de seguridad general del talud resulta ser de $FS = 0.94$.

8.4. MODELADO NUMÉRICO CON TRATAMIENTOS Y SOPORTES

Al igual que con la condición de análisis de equilibrio limite, para este caso se realizó el modelamiento considerando las bermas y anclajes recomendados, aplicando además el *Strength Reduction Factor* para la determinación del factor de seguridad.

El factor de seguridad considerando los tratamientos y soportes resulto de $FS = 2.59$. Las Figs. 21 a 23 muestran la deformación por cortante, desplazamientos horizontales y totales durante la formación de la etapa de la superficie de ruptura.

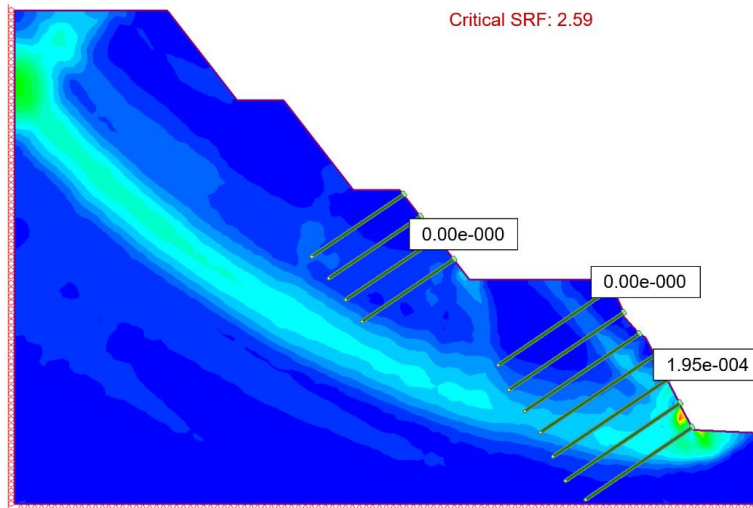


Figura 21. Deformación por cortante considerando tratamientos y soporte durante la etapa de formación de la superficie de ruptura (Sección Km 149+920).

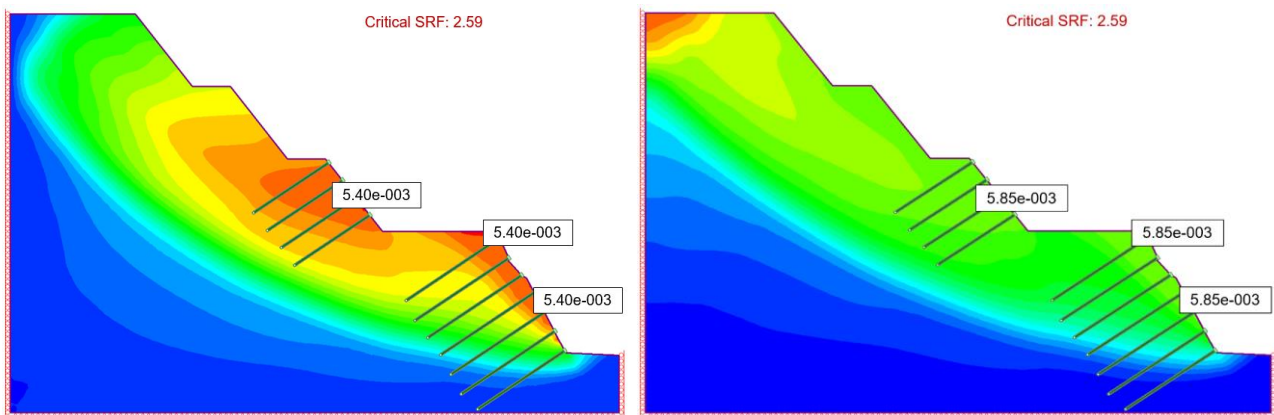


Figura 22. Desplazamientos horizontales considerando tratamientos y soporte durante la etapa de la formación de la superficie de ruptura (Sección Km 149+920). **Figura 23.** Desplazamientos totales considerando tratamientos y soporte durante la formación de la superficie de ruptura (Sección Km 149+920).

9. CONCLUSIONES

- El uso de un modelo elástico con un criterio de rotura no lineal fue el más adecuado en la determinación del círculo de falla rotacional, ya que los valores de los factores de seguridad que se obtuvieron corresponden con las condiciones reales del talud. Esto aunado a la aplicación de la herramienta Simulated Annealing, con la condición de falla de tipo No Circular que nos permitió delimitar la superficie de falla correspondiente al contacto del suelo, depósito de talud, así como de la roca andesítica; que además también nos permitió la calibración de los parámetros Geomecánicos.
- La aplicación por sí sola del programa Slide nos permite evaluar diferentes condiciones de tratamientos y soportes, los cuales, en conjunto con la estabilidad misma del talud, nos permite considerar la mejor decisión para la etapa de construcción.
- Los parámetros de la masa de roca definidos corresponden con el criterio de Hoek-Brown Ref. [15], cuyas variables más importantes conciernen a la resistencia a la compresión simple y la constante m_i para roca intacta, para así hacer uso de él. Por ello el uso de los diferentes criterios en la determinación de las propiedades de resistencia mecánica de las unidades litológicas y/o discontinuidades (Barton y Bandis) van limitados a la problemática y condiciones de proyecto, en donde los resultados obtenidos presentan la mayor proximidad a las condiciones reales del problema.
- Las revisiones post construcción permiten la validación de las decisiones tomadas en campo generando así un bagaje técnico invaluable, el cual apoyará en la toma de decisiones venidera

en cualquier proyecto, donde las incertidumbres pueden ocasionar desvíos en la conceptualización, análisis y determinación definitiva de actividades importantísimas como son la evaluación de la estabilidad en obras de esta magnitud. Con respecto al análisis estructural y principalmente el análisis cinemático, la generación de bloques potencialmente inestables resultaron estables para el mecanismo de falla en cuña, no así para el de falla planar.

- El uso de un software, en este caso del software *Phase2 5.0 (Rocscience Inc.)* nos permitió realizar modelos elastoplásticos durante la revisión del factor de seguridad, además de hacer uso de un criterio no lineal de esfuerzo-deformación (Hoek-Brown). Asimismo, este programa computacional nos permitió realizar el análisis de reducción de parámetros de resistencia para poder obtener el factor de seguridad y establecer así si el Vertedor era o no estable.
- El uso del SSR para la determinación del factor de seguridad de taludes, resulta ser una técnica factible ya que nos permite calcular el factor de seguridad mediante modelos numéricos, que toman en cuenta la geometría, modelos constitutivos, etapas o fases de cálculo, etc. Además de que en problemas muy complejos, como fue el caso presentado en este problema, las herramientas tradicionales de cálculo de equilibrio límite llegan en cierto punto a quedar limitadas, esto debido a que la superficie de ruptura en métodos de equilibrio límite no resulta ser realmente la más crítica.

REFERENCIAS

- [1] Barton, Nick; Bandis, S. *Technical note: some effects of scale on the shear strength of joints*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 17, 1980, p. 69-73.
- [2] Bieniawski, *Determining rock mass deformability – experiences from cases histories*, International Journal of Rock Mechanics and Mining, Abstr.15;2018. 237-147.
- [3] Celada B et al., *Development of a new calibration and interpretation procedure of pressuremeter test to obtain elastic parameter. The pressuremeter and its new avenues*. Ed Balkema, 1995, 265-272.
- [4] CFE-III, *Manual de Diseño de Obras Civiles*, Diseño por Sismo. México, 1993.
- [5] Duncan, J. M. *State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes*. Journal of Geotechnical engineering, 122(7), 1996, 577-596.
- [6] Ferrusquía-Villafranca, I. *Contribución al conocimiento Geológico de Oaxaca: El Área Laollaga-Lachivizá*: México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, 111, 110.
- [7] González de Vallejo, Luis et al, *Ingeniería Geológica*, Madrid, Ed. Prentice Hall, 2004.
- [8] Herrera, I, *Ecuaciones constitutivas de los suelos*, IIUNAM, México.
- [9] Hoek, E., & Brown, E. T., *The Hoek–Brown failure criterion and GSI*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(3), 2019, 445-463.
- [10] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *Prontuarios de Información geográfica*, 2009.
- [11] Martínez-Serrano, R. G., Solís-Pichardo, G., Flores-Márquez, E. L., Macías-Romo, C., & Delgado-Durán, J. (2008). *Geochemical and Sr-Nd isotopic characterization of the Miocene volcanic events in the Sierra Madre del Sur, central and southeastern Oaxaca*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25(1), 1-20.
- [12] Rico, A., Del Castillo, H., *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres*, Vol. 2, Ed. Limusa, México, 2006.
- [13] Rocscience, *Swedge*, “*Probabilistic analysis of the geometry and stability of surface wedges*”. User’s guide, 1991 - 2002.
- [14-] Rocscience *RocPlane*, “*Planar sliding stability analysis for rock slopes*”. User’s guide, 2001.
- [15] Rocscience, *Swedge*, “*Probabilistic analysis of the geometry and stability of surface wedges*”. User’s guide, 1991 - 2002.
- [16] Rocscience *Slide*, “*Equilibrium slope stability*”. User’s guide, 2002.
- [17] Servicio Geológico Mexicano (SGM), *Cartas Geológica-Minera Santiago Lachiguiri E15-C62.*, México, 2007.
- [18] Servicio Geológico Mexicano (SGM), *Cartas Geológica-Minera Juchitán E14-12.*, México, 2007.
- [19] Silva R. G., *Manual para el Trabajo Geológico de Campo*, DGAPA. UNAM, PROYECTO PAPIME PE-101909, Facultad de Ingeniería, 2011.