

EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN MAICILLO GRANÍTICO MEDIANTE MODELO FISURADO

Sebastián Escobar Carrasco¹ Matías Bravo Zapata² y José Montenegro Cooper³

RESUMEN:

Los suelos residuales graníticos obedecen su origen a procesos de meteorización física y/o química in situ que afectan a rocas intrusivas graníticas. En Chile, este tipo de suelos se encuentra mayoritariamente en zonas cercanas a la Cordillera de la Costa entre la región de Valparaíso y la región del Biobío, donde afloran cuerpos intrusivos del Batolito Costero que son sometidos a dichos procesos. Dado el constante desarrollo y expansión urbana en esta zona del país, es común que se proyecte la construcción de taludes para el emplazamiento de edificaciones, carreteras, autopistas o vías férreas para interconectar y permitir el desarrollo de estos lugares. El objetivo de esta investigación es realizar una evaluación sobre la estabilidad de un talud a través de un sistema automatizado mediante el modelo fisurado, utilizando el método de elementos finitos y la teoría de cota inferior y superior para el estudio numérico de 10000 modelos generados mediante Simulación Montecarlo. A través de los resultados obtenidos en esta investigación se puede establecer que los modelos fisurados poseen superficies de falla mixta, mientras que para modelos no fisurados la superficie de falla es circular, donde la influencia de las discontinuidades está dada por la orientación de estas, estableciendo que para ángulos relativos de $-80 < \beta - \alpha < -25^\circ$ y $-5^\circ < \beta - \alpha < 50^\circ$ las reducciones de los factores de seguridad para un modelo fisurado pueden alcanzar valores un 60% menores respecto a este mismo modelo sin considerar estas discontinuidades.

PALABRAS CLAVES: estabilidad de taludes; suelo residual; modelo fisurado.

ABSTRACT:

Granitic residual soils are due to in situ physical and/or mechanical weathering processes affecting granitic intrusive rocks. In Chile, this type of soil is mostly found in areas near the Cordillera de la Costa between the Valparaíso and Biobío regions, where intrusive bodies of the Coastal Batholith outcrop and are subjected to these processes. Given the constant development and urban expansion in this area of the country, it is common to project the construction of slopes for the placement of buildings, roads, highways or railroads to interconnect and allow the development of these sites. The objective of this research is to evaluate the stability of a slope through an automated system by means of the cracked model, using the finite element method and the theory of lower and upper bound for the numerical study of 10000 models generated by Montecarlo Simulation. Through the results obtained in this research it can be established that cracked models have mixed failure surfaces, while for non-cracked models the failure surface is circular, where the influence of the discontinuities is given by the orientation of these, establishing that for relative angles of $-80 < \beta - \alpha < -25^\circ$ and $-5^\circ < \beta - \alpha < 50^\circ$ the reductions of the safety factors for a fissured model can reach values 60% lower with respect to this same model without considering these discontinuities.

KEYWORDS: slope stability; residual soil; fissured model

¹Estudiante, Carrera Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, sescobar@ing.ucsc.cl

²Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, matias.bravo@ucsc.cl

³Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jmontenegro@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El constante desarrollo de la población y la continua expansión urbana trae consigo la reducción de espacios disponibles para el emplazamiento de edificaciones, caminos, carreteras, entre otras obras. Esto crea la necesidad de modificar la topografía de lugares donde se pretenden emplazar las distintas obras ingenieriles que contribuyen al desarrollo de la población. En particular, el 60% de la población de Chile se concentra en la zona central y centro-sur del territorio, siendo las regiones Metropolitana (40,5%), Biobío (11,6%) y Valparaíso (10,3%) las más pobladas según el último Censo de Población y Vivienda del año 2017 (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018). Como solución al problema anterior, los proyectos de ingeniería desarrollados en ciudades cercanas a la Cordillera de la Costa de la zona central, cuya densidad de población es muy alta, comúnmente proyectan realizar cortes en los cerros para el desarrollo de edificaciones y obras viales, donde una caracterización deficiente del suelo y del diseño del talud puede conllevar a situaciones de inestabilidad en las laderas.

El sometimiento de estas laderas y su exposición a agentes climáticos (lluvia y viento) y a agentes antrópicos (corte a los pies del talud, vibraciones, etc.) propician la ocurrencia de procesos de meteorización sobre el macizo rocoso. La meteorización corresponde a un proceso de alteración y/o degradación del material expuesto en superficie o ubicados a profundidades muy someras debido a procesos físicos y/o químicos producidos por los agentes mencionados anteriormente. Wesley (2010), señala que la ocurrencia de estos procesos da origen a los suelos residuales, debido a la meteorización física y química de la roca subyacente convirtiendo al macizo rocoso en partículas más pequeñas y en minerales de arcilla, reduciendo su densidad y resistencia. Del mismo modo, Blight (2012) señala que la formación de los suelos residuales obedece a procesos de meteorización y descomposición in situ de rocas o fragmentos de estas, dicho material alterado carece de procesos de transporte por lo que se ubica en su mismo lugar de formación sobre la roca de origen. En base a lo anterior, se entiende que este tipo de suelos es abundante en zonas con gran cantidad de vegetación, debido a que esta actúa como barrera evitando el desplazamiento del material alterado, además, se origina en zonas que se caracterizan por presentar altos porcentajes de humedad y un clima cálido, lo que favorece la ocurrencia de alteraciones químicas de la roca y sus minerales. De los procesos mencionados anteriormente, se puede decir que estos no son homogéneos y que obedecen a la acción de factores climáticos y antrópicos, por lo que existe una variabilidad considerable entre las características geomecánicas de este tipo de suelos. En línea con lo anterior, Wesley (2010) señala que para suelos residuales es muy común que el perfil del suelo sea heterogéneo, es decir, existe un cambio gradual de sus propiedades en función con la profundidad y posiblemente se observen discontinuidades o planos de falla.

Villalobos (2014) señala que los suelos presentes en nuestro país en la zona de la Cordillera de la Costa, entre las regiones de Valparaíso y Biobío, corresponden en su mayoría a suelos residuales derivados de la meteorización que actúa sobre el intrusivo granítico del Batolito Costero expuesto en superficie, suelo que es conocido comúnmente como Maicillo. En particular, el Maicillo corresponde a un tipo de suelo residual originado a partir de procesos de meteorización que afectan a las unidades litológicas de roca granítica generadas en condiciones de alta presión y temperatura, las que en la actualidad se encuentran apostadas sobre la superficie terrestre o a profundidades someras en zonas de alta humedad y pluviometría, y se caracteriza por ser fácil de disgregar, siendo posible removerlo a través de movimientos que requieren escasa cantidad de energía como, por ejemplo, en periodos de altas precipitaciones donde este tipo de suelo podría llegar a disgregarse debido a la escorrentía superficial, según estén dispuestos los planos de debilidad del material en el terreno (Cabrera, 2007; Villalobos, 2011). Flandes (2017), señala que este tipo de suelos se presenta como un suelo de grano grueso que conserva estructuras o discontinuidades de la roca de origen, por lo que se entiende que este tipo de suelos podría presentar problemas de estabilidad en el terreno cuando este es sometido a esfuerzos externos o a condiciones climáticas adversas. Lo anterior, en base a que dichas estructuras heredadas están íntimamente relacionadas con los planos de falla presentes en este tipo de suelos residuales (Villalobos, 2011) y, además, de acuerdo con Blight (2012) la resistencia global de este tipo de suelos se rige por la orientación predominante y por la frecuencia en que pueden encontrarse este tipo de discontinuidades en relación con la dirección de aplicación de los distintos esfuerzos y con los parámetros resistentes del suelo.

Wesley (2010) establece que las propiedades resistentes de los suelos residuales son generalmente buenas, en especial en aquellos suelos derivados de la meteorización de rocas ígneas y volcánicas. Lo anterior, se deduce de acuerdo con sus observaciones, donde laderas que se encuentran formadas por este tipo de suelos se mantienen estables a pesar de tener pendientes mucho más pronunciadas que otros tipos de suelos como, por ejemplo, los suelos sedimentarios. A diferencia de lo anterior, la influencia de las discontinuidades que se pueden encontrar en este tipo de suelos es negativa debido a que los planos de debilidad actúan sobre la estabilidad del talud, generando situaciones de inestabilidad y/o deslizamientos.

La correcta caracterización geométrica y geomecánica de un talud y del material que lo compone es un principio fundamental para realizar un estudio de estabilidad y garantizar su seguridad. La estabilidad de taludes puede ser cuantificada a través del factor de seguridad que depende de los esfuerzos que actúan sobre el terreno, las características geométricas del talud y las características geomecánicas del suelo. La determinación del factor de seguridad puede abordarse a través de distintos métodos como, por ejemplo, el Método de Equilibrio Límite (LEM), Método del Análisis Límite, Método de las Diferencias Finitas o bien, mediante técnicas más precisas como el Método de Elementos Finitos (Agam et al. 2016; Beneyto et al. 2011). Los métodos de equilibrio límite corresponden a un método ampliamente utilizado que se basa en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de suelo potencialmente inestable, sin tomar en cuenta las deformaciones del suelo provocadas por esfuerzos solicitantes (Fernández, 2018). Dentro de estos, se agrupan los métodos de las rebanadas o dovelas, los que dividen una masa de suelo por encima de la superficie de deslizamiento en un número finito de rebanadas las que pueden cortarse de forma vertical u horizontal. Por otro lado, Beneyto et al. (2011) señala que los métodos de equilibrio límite destacan por su simplicidad y facilidad de usar, donde se asumen condiciones de equilibrio estático para una superficie de deslizamiento supuesta y se busca la superficie de deslizamiento crítico donde el factor de seguridad es mínimo, mientras que los métodos de elementos finitos es capaz de simular comportamientos físicos sin la necesidad de realizar simplificaciones, por lo que los resultados obtenidos mediante un análisis de elementos finitos son de mayor precisión y confiabilidad. Su desarrollo consiste en la división de un continuo de infinitos grados de libertad en pequeños elementos interconectados por nodos, los que corresponden a ecuaciones que rigen el comportamiento del elemento (Morales et al. 2019). Por último, Zheng et al. (1998), presenta formulaciones para los teoremas de límites superiores e inferior de la plasticidad para suelos fisurados y rocas con discontinuidades. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, esta investigación se enmarca a modo general en la evaluación de la estabilidad de taludes en suelos residuales graníticos considerando un modelo fisurado en dicho análisis, donde el suelo o la masa rocosa puede tratarse como un material continuo rígido-plástico anisotrópico.

El objetivo de esta investigación es evaluar la influencia de las estructuras heredadas de suelos residuales graníticos a través de un modelo fisurado, donde la inclinación de la fisura representa la orientación de la discontinuidad. Para representar de mejor forma la influencia de las estructuras heredadas, este trabajo asume condiciones estáticas del talud y no se considera nivel freático. Los valores de los parámetros resistentes del suelo consideran un rango de valores de suelos residuales graníticos encontrados en la literatura científica. La elaboración de estas simulaciones se realiza a través de un sistema automatizado que considera la utilización del modelo fisurado en los taludes e implementa la simulación de Montecarlo para la elaboración y ejecución de los modelos con valores de entrada aleatorios (parámetros resistentes) según el rango especificado. Por último, se considera la utilización del Método de Elementos Finitos y la teoría de Cota Superior y Cota Inferior de Análisis Límite para el estudio numérico de las 10000 simulaciones desarrolladas en esta investigación y para el cálculo del factor de seguridad asociado a los modelos generados se utiliza el método de Reducción de Resistencia al Corte (SSRM).

2. METODOLOGÍA

En base a lo anterior, el desarrollo de esta investigación contempla la realización de análisis de estabilidad de taludes a través del Método de Elementos Finitos para la elaboración de un modelo geotécnico en base a un modelo fisurado para suelos residuales graníticos, donde se consideren discontinuidades o planos de inestabilidad presentes en estos tipos de suelo utilizando la teoría de Análisis Límite Superior y Límite Inferior. Además, para determinar el factor de seguridad asociado a los modelos generado a través de un sistema automatizado se considera el Método de Reducción de la Resistencia al Corte (SSRM). Por último, para la elaboración del modelo geotécnico se considera el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb.

2.1. Modelo Numérico

Los métodos numéricos y herramientas computacionales, y en específico el Método de Elementos Finitos, han tenido un rápido desarrollo y se han vuelto cada vez más populares para el análisis de estabilidad de taludes dado que los resultados obtenidos son más confiables y precisos. El presente estudio aplica la técnica de Reducción de la Resistencia al Corte (SSRM), que ya ha sido utilizada en análisis de estabilidad de taludes desarrollados por Duncan (1980), Griffiths y Lane (1999) y Li et al. (2009). La técnica de Reducción de la Resistencia al Corte (SSRM) se aplica normalmente para calcular el factor de seguridad reduciendo o aumentando progresivamente la resistencia al corte del material para llevar el talud a un estado de equilibrio límite (Dawson et al. 1999). Esta técnica también se adopta en varios programas geotécnicos computacionales de elementos finitos muy conocidos. De acuerdo con Hosni y Berga (2016), las principales ventajas del SSRM son:

- i. La superficie crítica de falla se encuentra automáticamente a partir de la aplicación de las cargas gravitatorias y/o la reducción de la resistencia al corte.
- ii. No requiere ninguna suposición sobre la distribución de la fuerza de cizallamiento, y es aplicable a muchas condiciones complejas y puede dar información como tensiones, movimientos y presiones de poros.

Para el análisis límite, Zheng et al. (1998) señala que el teorema del límite superior es ampliamente utilizado en el área de diseño geotécnico y se considera como una herramienta muy efectiva para realizar el análisis de estabilidad y sus formulaciones generales utilizan elementos finitos y programación lineal que considera sólo la velocidad, nodos de falla y la disipación de energía. En líneas generales con lo anterior, Sloan (1988; 1989) señala que el límite superior de la carga límite real puede deducirse al equiparar la potencia disipada de cualquier campo de velocidades cinemáticamente admisible y la potencia disipada por las cargas externas donde los desplazamientos son continuos entre los elementos, produciendo resultados rigurosos para el límite superior, mientras que para el teorema de límite inferior se establece que la estimación del límite inferior de la carga límite real está dada por cualquier campo de tensión estáticamente admisible, donde solo en la interfaz de los elementos triangulares del modelo se permiten las discontinuidades de tensiones.

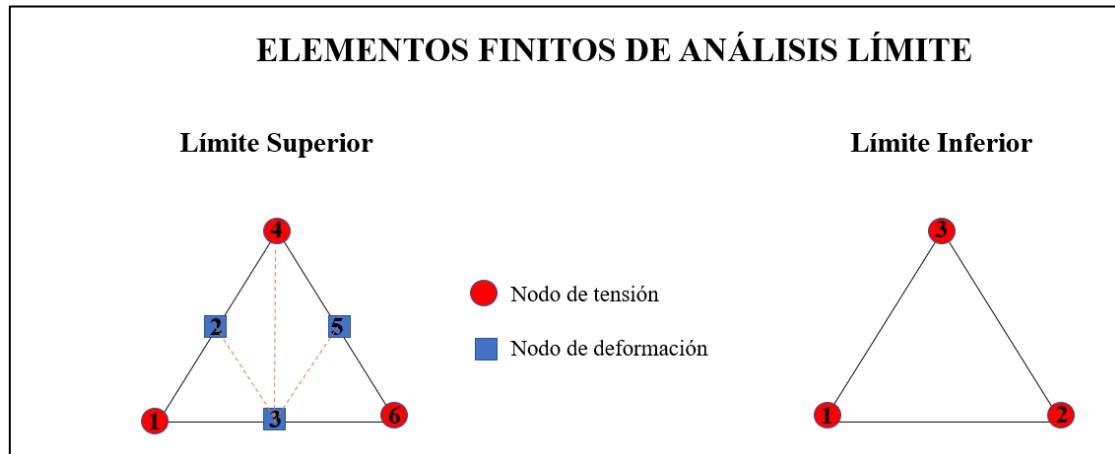


Figura 1. Elementos triangulares para Análisis Límite Superior y Análisis Límite Inferior. Elaborado a partir de Bravo-Zapata et al. 2022 y Zheng et al. 1998.

2.2. Modelo Geotécnico

El presente estudio considera para el suelo granítico residual la utilización del criterio de rotura de Mohr-Coulomb y un modelo elastoplástico perfecto originado a partir de la Ley de Hooke y del criterio de falla generalizado de Mohr-Coulomb, que permite definir la tensión de corte del suelo que se alcanza en un plano en función de la tensión efectiva sobre el mismo y los parámetros resistentes del suelo. Este modelo constitutivo se define a través de la Ecuación (1). Donde τ corresponde a la máxima tensión de corte, c es la cohesión del terreno, σ' es la tensión normal efectiva y Φ es el ángulo de rozamiento interno del terreno.

$$\tau = c + \sigma' * \tan(\Phi) \quad (1)$$

Considerando la influencia de las discontinuidades presentes en el terreno según los modelos de taludes simulados se tiene que según Hosni y Berga (2016) la resistencia de los materiales con patrones de fisuras regulares puede explicarse utilizando una combinación entre el criterio de falla de Mohr-Coulomb y las restricciones sobre las tensiones normales y de corte señaladas por Davis (1980) y Zheng (1998), donde K corresponde a la resistencia a la tracción del plano y se define el plano de fisura cuya fuerza está limitada por la siguiente relación matemática (2):

$$|\tau| + \sigma * \tan(\Phi) - c \leq 0, \quad \sigma \leq K \quad (2)$$

De esta manera, en la Figura 2 se presenta un esquema de la capa de suelo de material fisurado con su ángulo de inclinación α , del cual se conformarán los taludes a analizar.

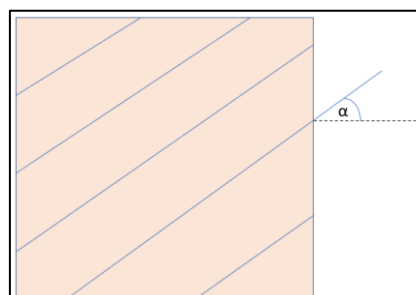


Figura 2. Material fisurado con ángulo de inclinación α .

El criterio de falla de Mohr-Coulomb utilizado en programas computacionales para el análisis de estabilidad de taludes que consideran el Método de Elementos Finitos disminuyen gradualmente los parámetros de resistencia (c y Φ) del talud hasta que se produce la inestabilidad. De esta manera se tiene que el factor de seguridad calculado a través de la técnica de Reducción de la Resistencia (SRM), corresponde a una relación entre los parámetros iniciales del suelo y los parámetros reducidos a partir del factor de reducción de resistencia (Hosni y Berga, 2016). A continuación, se presenta dicha relación matemática. Donde, FS corresponde al factor de seguridad, c es la cohesión del terreno, Φ es el ángulo de fricción del terreno, c_r es la cohesión del terreno reducida y Φ_r es el ángulo de fricción del terreno reducido.

$$FS = \frac{c}{c_r} = \frac{\tan(\Phi)}{\tan(\Phi_r)} \quad (4)$$

De esta manera, en la Figura 3 se resume el modelo geotécnico empleado en esta investigación para la evaluación de la estabilidad de taludes en suelo granítico residual mediante la utilización de los métodos y modelos señalados anteriormente.

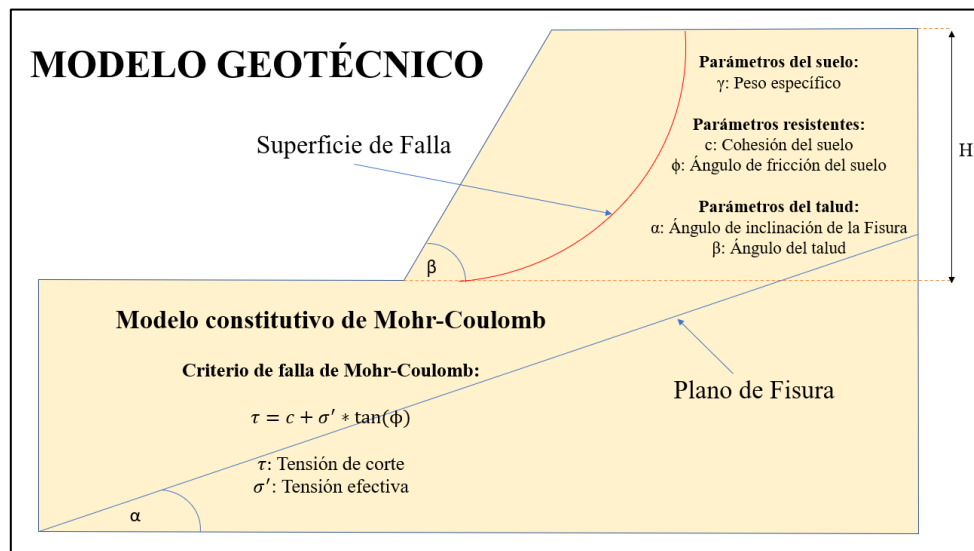


Figura 3. Modelo geotécnico para un talud de suelo granítico residual considerando fisuras presentes en el terreno.

2.3. Diseño Experimental

El presente estudio contempla la elaboración de 10.000 simulaciones de taludes, considerando el modelo geotécnico descrito en el apartado 2.2. Del total de simulaciones, 5.000 de ellas corresponden a modelos no fisurados, es decir, que no consideran discontinuidades en el terreno, mientras que los 5.000 restantes corresponden a modelos fisurado, es decir, sí consideran estas discontinuidades. Lo anterior, permite realizar un análisis comparativo entre estos modelos a modo de entender la influencia sobre la estabilidad de estos taludes en suelos residuales graníticos que presenten fisuras. Los valores de entrada utilizados para la generación de las simulaciones corresponden al porcentaje de reducción de los parámetros, los parámetros de estado del suelo (peso específico γ), parámetros resistentes del suelo: cohesión (c), ángulo de fricción (ϕ), y parámetros geométricos del talud: altura (H), ángulo de inclinación del talud (β) y el ángulo de inclinación de la fisura (α). Estas simulaciones se realizan a través de simulación Montecarlo y el rango de valores utilizados para la elaboración de los modelos se presenta en la Tabla 1, los que corresponden a valores típicos para suelos residuales graníticos obtenidos a través de recopilación bibliográfica (MOP, 2021; Wesley, 2009; Cabrera, 2007; Coutinho et al. 2019; Dearman et al. 1978; Flandes, 2017; Heidemann et al. 2021; Liu et al. 2022; Niu et al. 2017; Rodríguez, 2015; Townsend, 1985, Viana Da Fonseca, 2006).

Tabla 1. Rango de valores utilizados para la generación de las simulaciones.

Parámetro	H (m)	β (°)	α (°)	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	%PR
Valor Mínimo	5	20	0	0	15	15	0%
Valor Máximo	60	80	180	30	46	22	60%

A partir de las modelaciones realizadas, se implementa el Método de Reducción de Resistencia al Corte (SSRM) a través del software OptumG2, el corresponde a un programa basado en elementos finitos en dos dimensiones utilizado para realizar distintos análisis de resistencia y deformación a problemas geotécnicos de valores límite (Krabbenhoft et al. 2016). Su utilización permite determinar los factores de seguridad de los taludes simulados a partir de un sistema automatizado.

2.4. Análisis de las Simulaciones

El análisis de las simulaciones contempla la elaboración de distintas gráficas de dispersión, donde los valores a analizar en las gráficas corresponden a la reducción del factor de seguridad, diferencia entre el ángulo relativo del talud y el ángulo de la fisura, porcentaje de reducción de los parámetros (%PR), parámetros resistentes del suelo reducidos y los factores de seguridad (FS) para el caso fisurado y no fisurado. Una vez realizadas las gráficas es posible establecer rangos de valores para los ángulos relativos talud – fisura ($\beta - \alpha$) de acuerdo con las reducciones del factor de seguridad determinadas para el modelo fisurado en comparación con un modelo no fisurado. Por consiguiente, se escogen tres modelos en los rangos previamente establecidos para analizar las superficies de falla de cada una de estas simulaciones para el caso fisurado y no fisurado. Además, se presentan las características geométricas y geomecánicas de cada uno de los modelos. A continuación, se presenta la relación matemática que permite el cálculo de la reducción del factor seguridad.

$$\text{Reducción FS} = \left(\frac{FS_{NF} - FS_F}{FS_{NF}} \right) \quad (5)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo se dividen en la presentación de los resultados de los factores de seguridad obtenidos, análisis de las superficies de deslizamiento y la discusión. A continuación, se comenzará con el primero de ellos.

3.1. Gráficos de dispersión del Factor de Seguridad

El gráfico de dispersión presentado en la Figura 4 relaciona el valor de la reducción del factor de seguridad con el ángulo relativo del talud - fisura ($\beta - \alpha$) de cada uno de los modelos simulados para un talud de suelo granítico residual. A partir de esta figura se establecen 6 rangos para la realización del análisis. En primer lugar, se tiene el rango correspondiente a $-125^\circ > \beta - \alpha$, donde se presentan reducciones del factor de seguridad menores al 20%. En segundo lugar, el rango comprendido entre $-125^\circ < \beta - \alpha < -80^\circ$ corresponde a un mínimo dentro de la gráfica donde se presentan reducciones del factor de seguridad de hasta un 20%, siendo menores al 10% entre $-115^\circ < \beta - \alpha < -105^\circ$. Por otra parte, entre $-80^\circ < \beta - \alpha < -25^\circ$, se presenta uno de los máximos de la figura donde las reducciones del FS alcanzan el 60% aproximadamente. Entre los $-25^\circ < \beta - \alpha < -5^\circ$ se tiene el segundo mínimo, donde se presentan reducciones del FS menores al 20%, sin embargo, existen casos puntuales cercanos a un $\beta - \alpha$ de -25° donde el valor de la reducción del FS varía entre el 20% al 50%. Entre $-5^\circ < \beta - \alpha < 50^\circ$ se presenta el segundo máximo donde las reducciones del FS obtenidas alcanzan hasta un 60% y, diferencia del máximo anterior, este presenta menor dispersión de los resultados. Por último, para $\beta - \alpha > 50^\circ$, se presentan reducciones del FS menores al 20%.

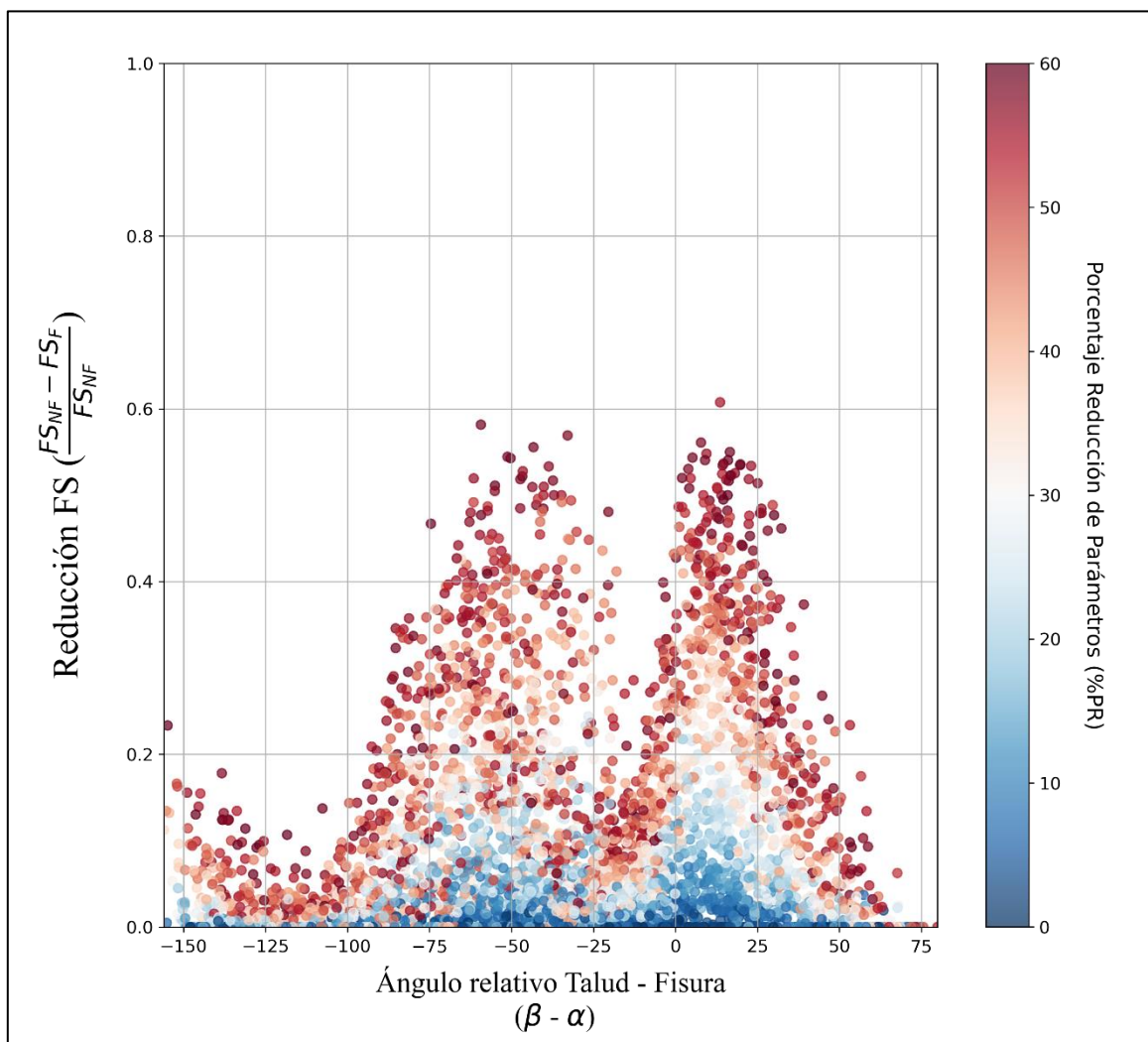


Figura 4. Reducción del factor de seguridad según el ángulo relativo talud - fisura.

En línea con lo anterior, la Figura 5 presenta la relación entre el porcentaje de reducción de los parámetros (%PR) y el ángulo relativo talud - fisura. En esta, se observa que las mayores reducciones del factor de seguridad se dan entre los rangos $-80^\circ < \beta - \alpha < -25^\circ$ y $-5^\circ < \beta - \alpha < 50^\circ$, los que coinciden con los máximos presentados en la figura anterior. De esta manera se entiende que para reducciones del FS mayores al 30% se presentan porcentajes de reducción de los parámetros de entre el 40% al 60% de acuerdo con los rangos mencionados anteriormente.

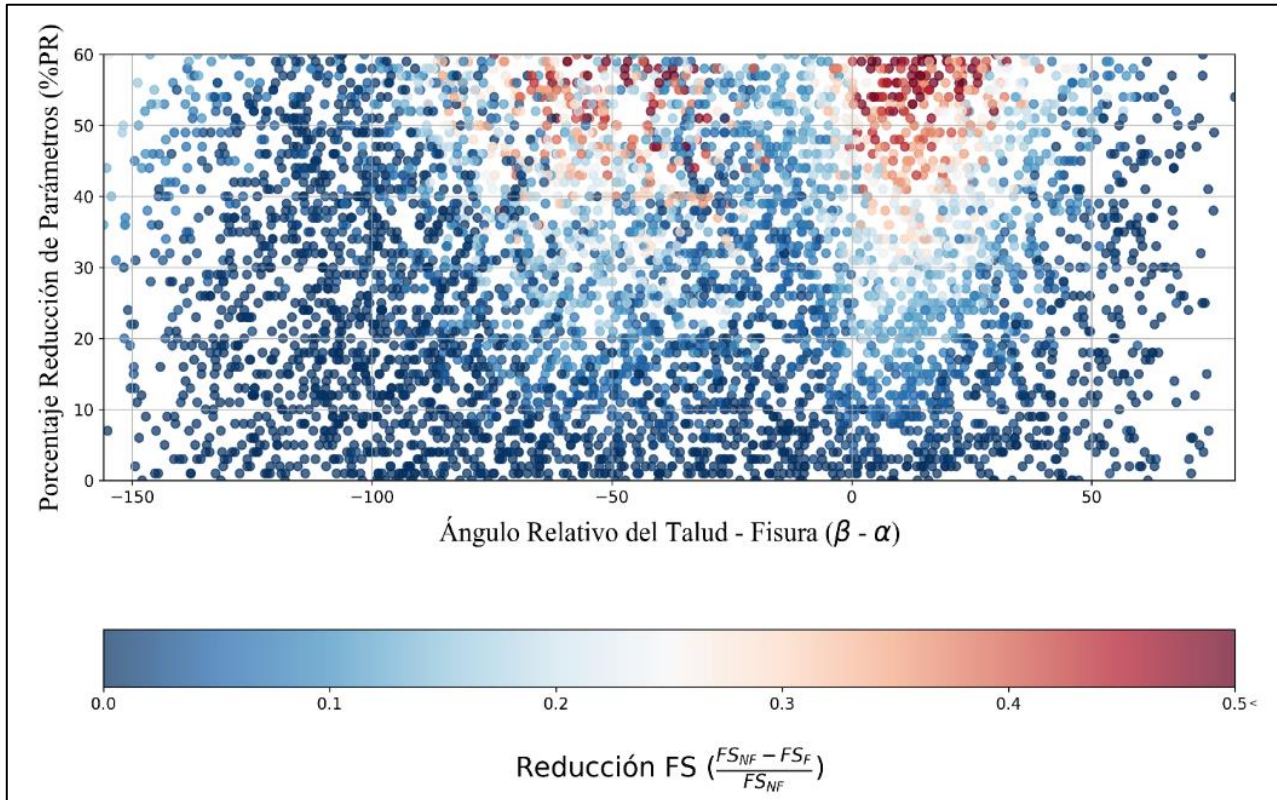


Figura 5. Relación entre el porcentaje de reducción de los parámetros (%PR) y el ángulo relativo talud - fisura.

Por su parte, la Figura 6 presenta la relación entre la reducción del factor de seguridad y los parámetros resistentes del suelo reducidos (cohesión reducida C_F y ángulo de fricción reducido ϕ_F), de acuerdo con el porcentaje de reducción de los parámetros (Fig. 5a) y con el ángulo relativo talud - fisura (Fig. 5b). En la Figura 5a, se observa una disminución progresiva de la reducción del factor de seguridad a medida que aumenta la cohesión, es decir, a medida que aumenta la cohesión, aumenta el factor de seguridad. En específico esta disminución comienza a partir de los 20 kPa donde de tener reducciones de hasta un 60% aproximado, se obtienen reducciones menores al 10% para cohesiones entre 35 kPa a 45 kPa. Por otro lado, para el ángulo de fricción se presenta un comportamiento similar, ya que se observa una disminución progresiva de la reducción del FS a medida que aumenta el ángulo de fricción a partir de los 13° . En específico, en la Figura 5a se presenta que la mayoría de los modelos con $C_F \geq 15$ kPa y una reducción del FS sobre el 10% presentan un $\%PR \geq 40\%$, mientras que para un $\phi_F \leq 15^\circ$ y una reducción del FS sobre el 20% los modelos presentan un $\%PR \geq 40\%$. Por último, respecto a la Figura 5b se observa que la mayoría de los modelos cuyo ángulo relativo talud - fisura se encuentra entre $-35^\circ < \beta - \alpha < 10^\circ$ presenta reducciones del FS mayores al 10%, mientras que aquellos con $\beta - \alpha < -35^\circ$ presentan reducciones del FS menores al 10%.

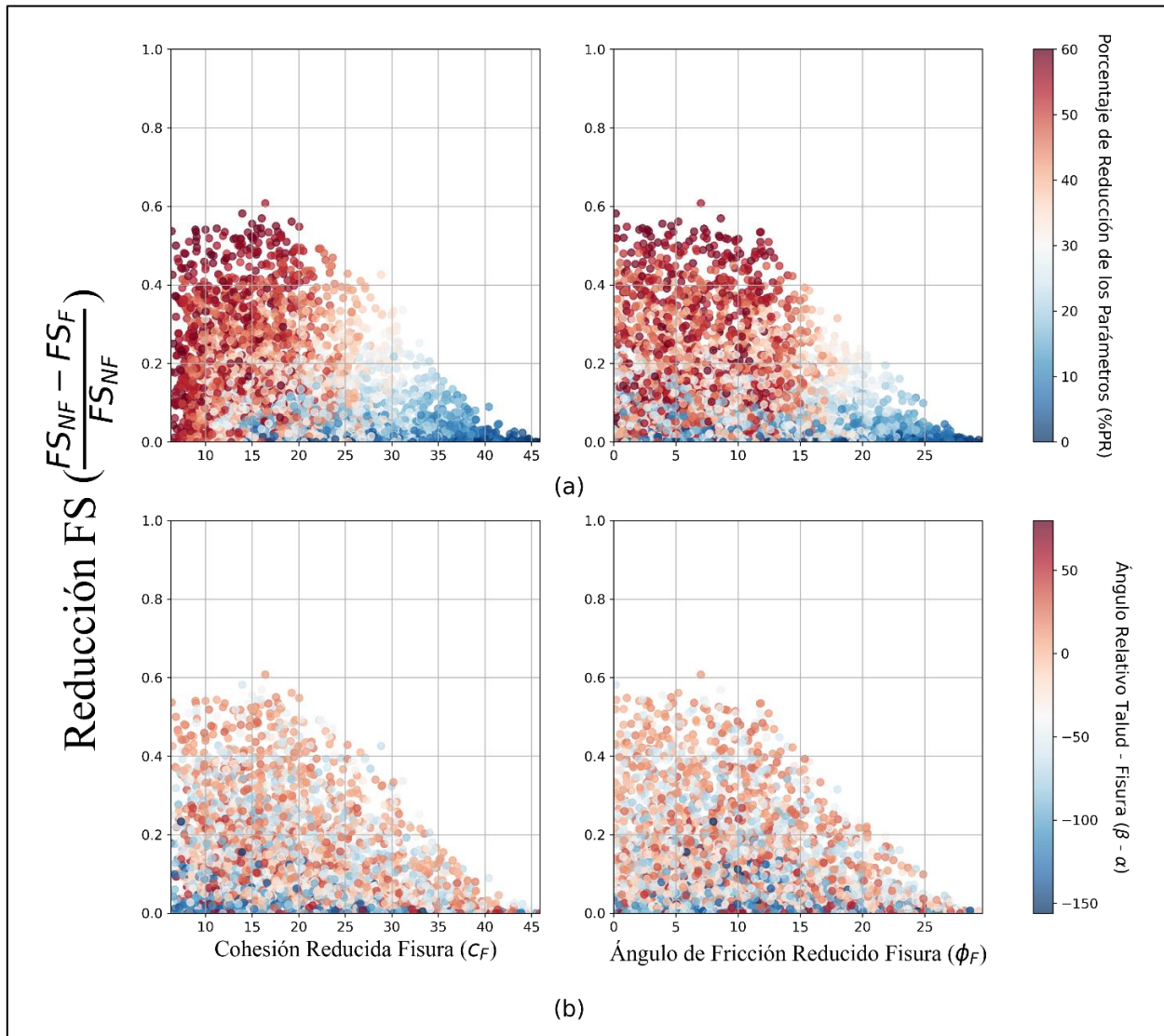


Figura 6. Relación entre la reducción del factor de seguridad y los parámetros resistentes reducidos (cohesión y ángulo de fricción) según (a) Porcentaje de reducción de los parámetros y (b) Ángulo relativo talud - fisura.

La Figura 7 presenta la relación entre los factores de seguridad de los modelos fisurados (FS_F) y de los modelos no fisurados (FS_{NF}) con el ángulo relativo talud - fisura (Fig. 7a) y el porcentaje de reducción de los parámetros (Fig. 7b). En ambas figuras se observa un comportamiento lineal entre el FS_F y FS_{NF} para la mayoría de los modelos cuyo $\beta - \alpha$ sea menor a -80° o mayor a 50° (Fig. 7a). Del mismo modo, en la Figura 7b esta linealidad se observa para modelos cuyo porcentaje de reducción (%PR) sea menor al 20%. Por otra parte, las principales variaciones entre los factores de seguridad para modelos fisurados y los factores de seguridad de modelos no fisurados ocurre para $-25^\circ < \beta - \alpha < 5^\circ$ (Fig. 7a) y para %PR mayores al 30%. Cabe destacar que en la gráfica se pueden observar modelos cuyo FS_{NF} es mayor a 1, pero que al incluir las fisuras para el modelado se reduce el valor del factor de seguridad ($FS_F < 1$).

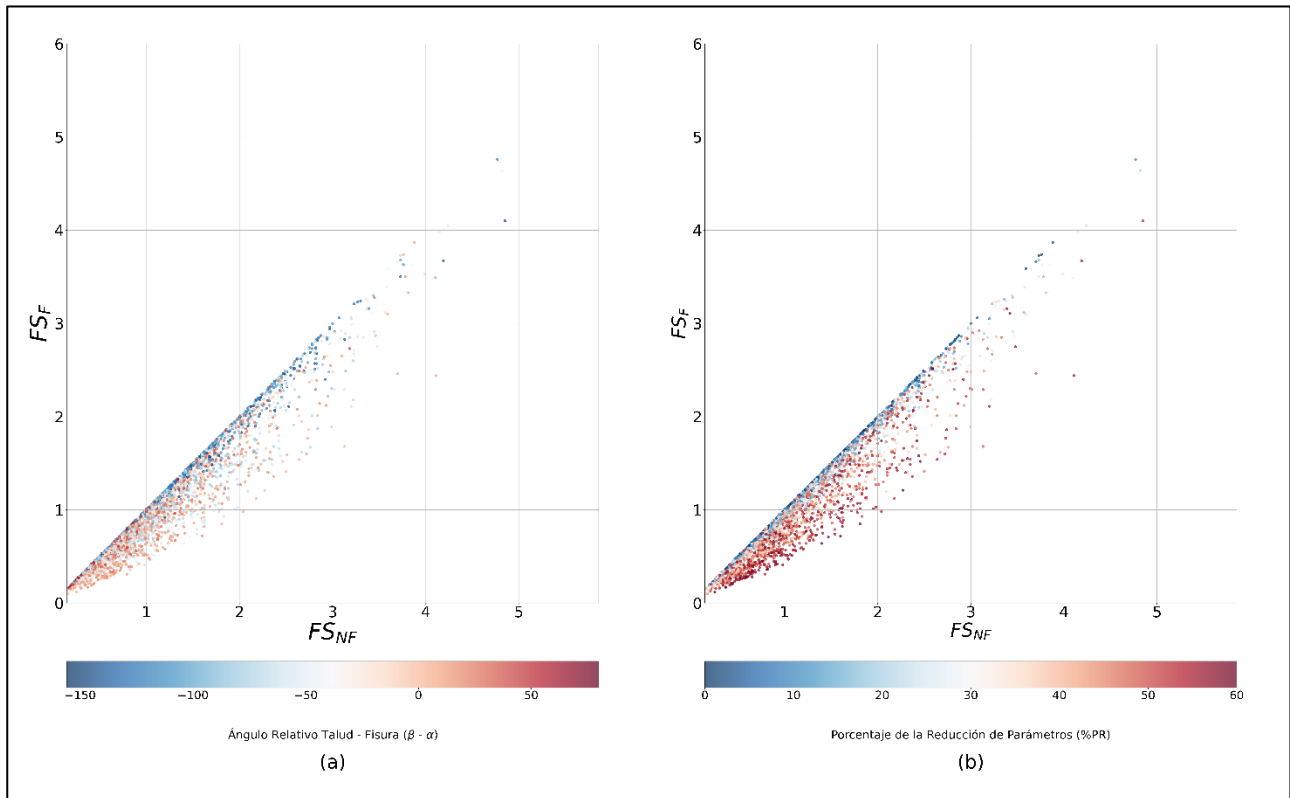


Figura 7. Relación entre los factores de seguridad de los modelos fisurados (FS_F) y de los modelos no fisurados (FS_{NF}) según (a) Ángulo relativo talud - fisura y (b) Porcentaje de reducción de los parámetros (%PR).

3.2. Superficies de falla

En la Figura 8 se presentan las superficies de falla para el rango $\beta - \alpha < -125^\circ$, de los modelos 375 (Fig. 8a), 550 (Fig. 8b) y 4903 (Fig. 8c). Para el modelo 372, en el caso fisurado se observa una superficie de falla mixta, siendo plana al pie del talud y circular hacía la corona, además concentra las deformaciones en la parte baja del talud. Mientras que, para el caso no fisurado, se observa una superficie de falla circular que concentra las deformaciones en el pie del talud y se disipan hacía la corona. Además, para este modelo se observa que con la inclusión de las fisuras el factor de seguridad disminuye de 1.05 a 0.93. Por su parte, el modelo 550 para el caso fisurado se presenta una superficie de falla mixta, siendo plana al pie del talud y circular hacía la corona, concentrando deformaciones al pie del talud y al interior del cuerpo este. Sin embargo, para el caso no fisurado de este modelo se presenta una superficie de falla circular, concentrando las deformaciones en el pie del talud. Por último, en el modelo 4903 no se observan grandes diferencias entre las superficies de falla y tampoco entre la distribución de deformaciones.

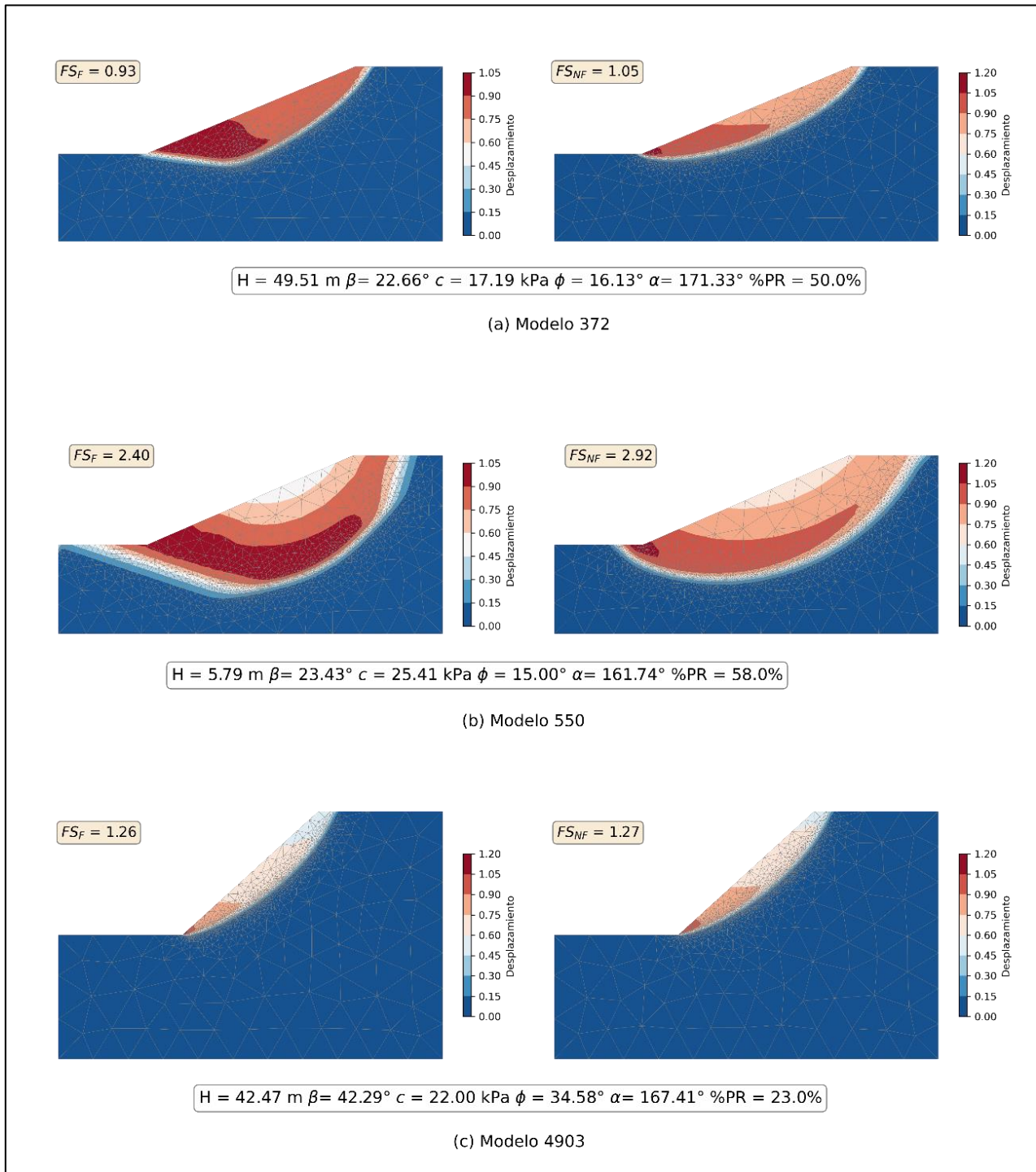


Figura 8. Superficie de falla de modelos fisurados (izquierda) y no fisurados (derecha), con ángulo relativo talud – fisura menor a -125° . (a) Modelo 372 con reducción del FS del 11%, (b) Modelo 550 con reducción del FS del 18% y (c) Modelo 4903 con reducción del FS del 1%.

En la Figura 9 se presentan las superficies de falla para $-125^\circ < \beta - \alpha < -80^\circ$. La Figura 9a corresponde al modelo 21, donde existe una alta reducción del factor de seguridad y, en específico, para el caso fisurado se observa una superficie de falla mixta, siendo plana en su extensión desde la corona del talud hasta el pie de este, donde se observa una superficie de falla circular y las deformaciones para este caso se acumulan en el pie del talud. Para el caso no fisurado se presenta una superficie de falla circular donde las deformaciones se concentran al pie del talud. En segundo lugar, el modelo 102 (Fig. 9b) presenta una superficie de falla mixta, siendo plana en la corona del talud y circular en la parte inferior de este para el caso fisurado, mientras que para el caso no fisurado se presenta una superficie de falla circular donde se acumulan las deformaciones al pie del talud. Por último, el modelo 1885 (Fig. 9c) no presenta mayores diferencias entre las superficies de falla para el caso fisurado y no fisurado, sin embargo, la acumulación de deformaciones para en el caso no fisurado es mayor en comparación al caso fisurado.

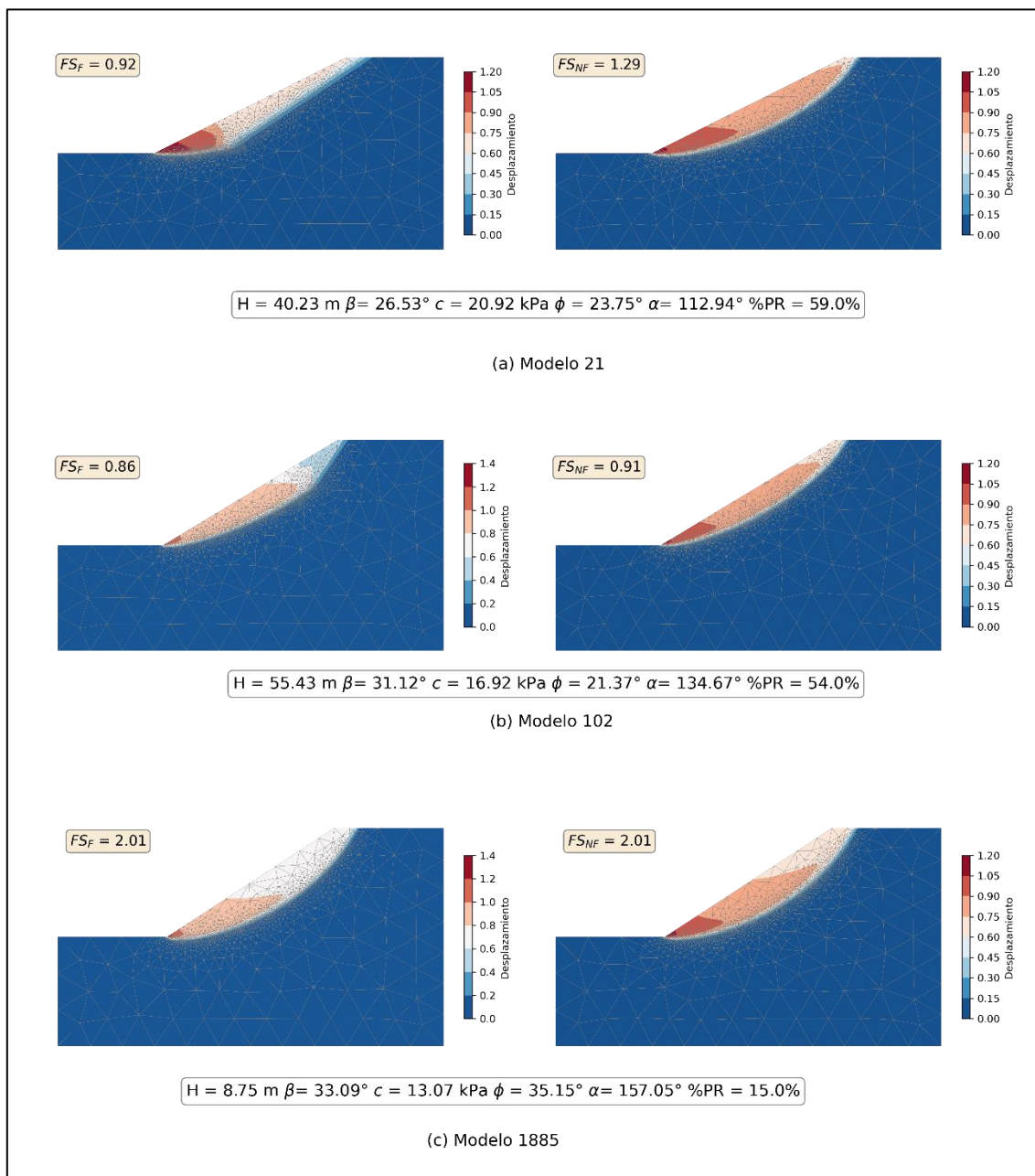


Figura 9. Superficie de falla de modelos fisurados (izquierda) y no fisurados (derecha), con ángulo relativo entre $-125^\circ < \beta - \alpha < -80^\circ$. (a) Modelo 21 con reducción del FS del 29%, (b) Modelo 102 con reducción del FS del 5% y (c) Modelo 4903 con reducción del FS del 0%.

En la Figura 10 se presentan las superficies de falla para los ángulos relativos $-80^\circ < \beta - \alpha < -25^\circ$. La primera corresponde al modelo 8 (Fig. 10a), donde existe una alta reducción del factor de seguridad y, en específico, para el caso fisurado se observa una superficie de falla plana en su extensión desde la corona hasta el pie del talud, mientras que para el caso no fisurado se presenta una superficie de falla circular donde se acumulan las deformaciones al pie del talud. En segundo lugar, para el modelo 11 (Fig. 10b), se observa una superficie de falla mixta que es plana en la corona y pie del talud y circular entre estos, mientras que para el caso no fisurado se presenta una superficie de falla circular (para ambos casos las deformaciones son altas a lo largo de toda la superficie de falla). Por último, para el modelo 4992 (Fig. 10c), en el caso fisurado se observa una superficie de falla mixta que es plana en la corona del talud y circular al pie de este, mientras que para el caso no fisurado se presenta una superficie de falla circular, presentando en ambos casos deformaciones más altas al pie del talud.

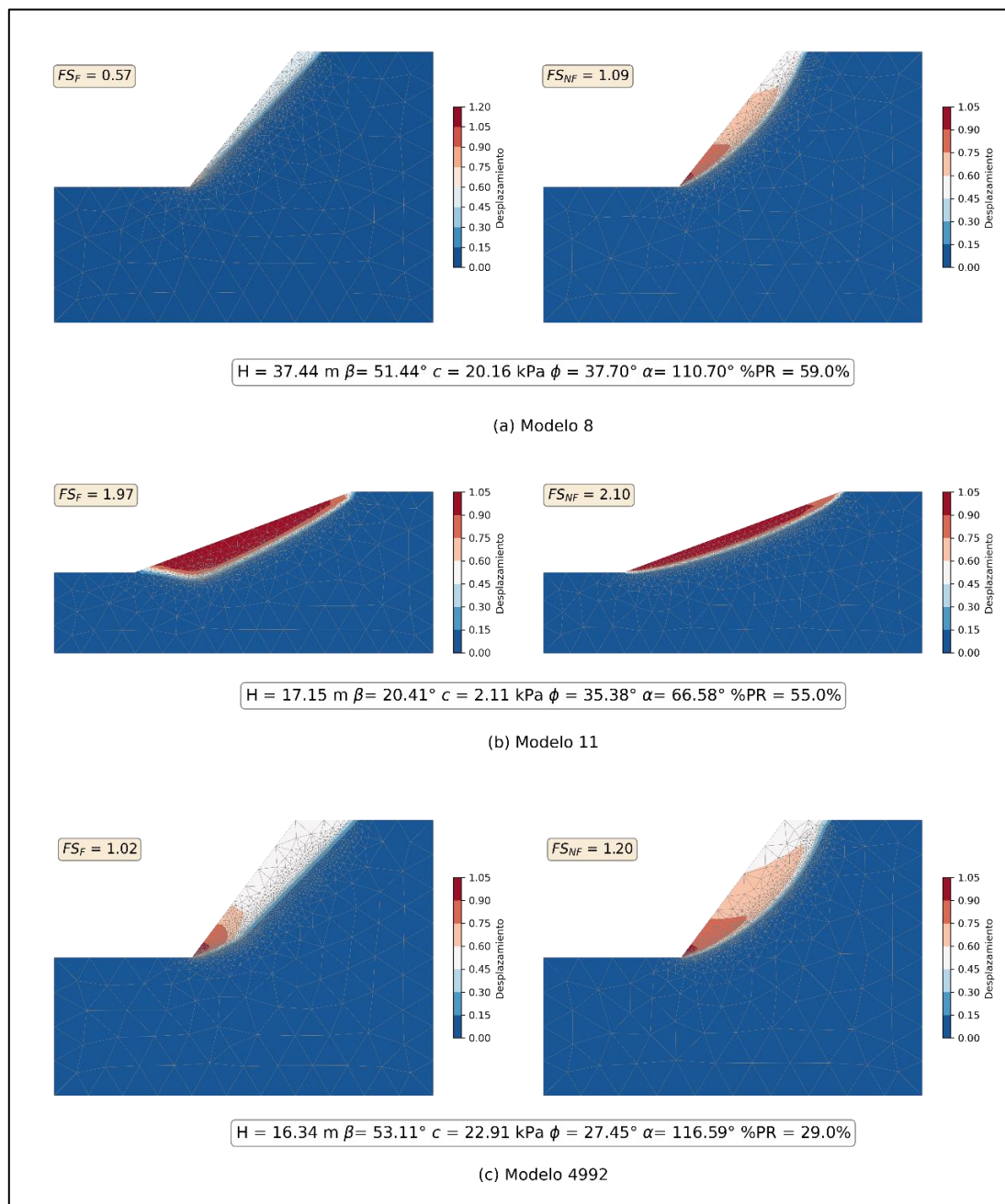


Figura 10. Superficie de falla de modelos fisurados (izquierda) y no fisurados (derecha), con ángulo relativo entre $-80^\circ < \beta - \alpha < -25^\circ$. (a) Modelo 8 con reducción del FS del 48%, (b) Modelo 11 con reducción del FS del 6% y (c) Modelo 4992 con reducción del FS del 15%.

En la Figura 11 se presentan las superficies de falla para los ángulos relativos $-25^\circ < \beta - \alpha < -5^\circ$. El modelo 2 (Fig. 11a), presenta una superficie de falla mixta para el caso fisurado, con forma plana desde la corona del talud que se vuelve circular al pie de este donde concentra las mayores deformaciones, mientras que para el caso no fisurado se presenta una superficie de falla circular. Por su parte el modelo 4931 (Fig. 11b), se presentan las mismas condiciones del modelo 2, sin embargo, la extensión de la superficie de falla plana es extremadamente menor. Por último, para el modelo 4991 (Fig. 11c) se observa la misma condición de los modelos anteriores, tanto para el caso fisurado y para el caso no fisurado, sin embargo, existe una alta reducción del factor de seguridad.

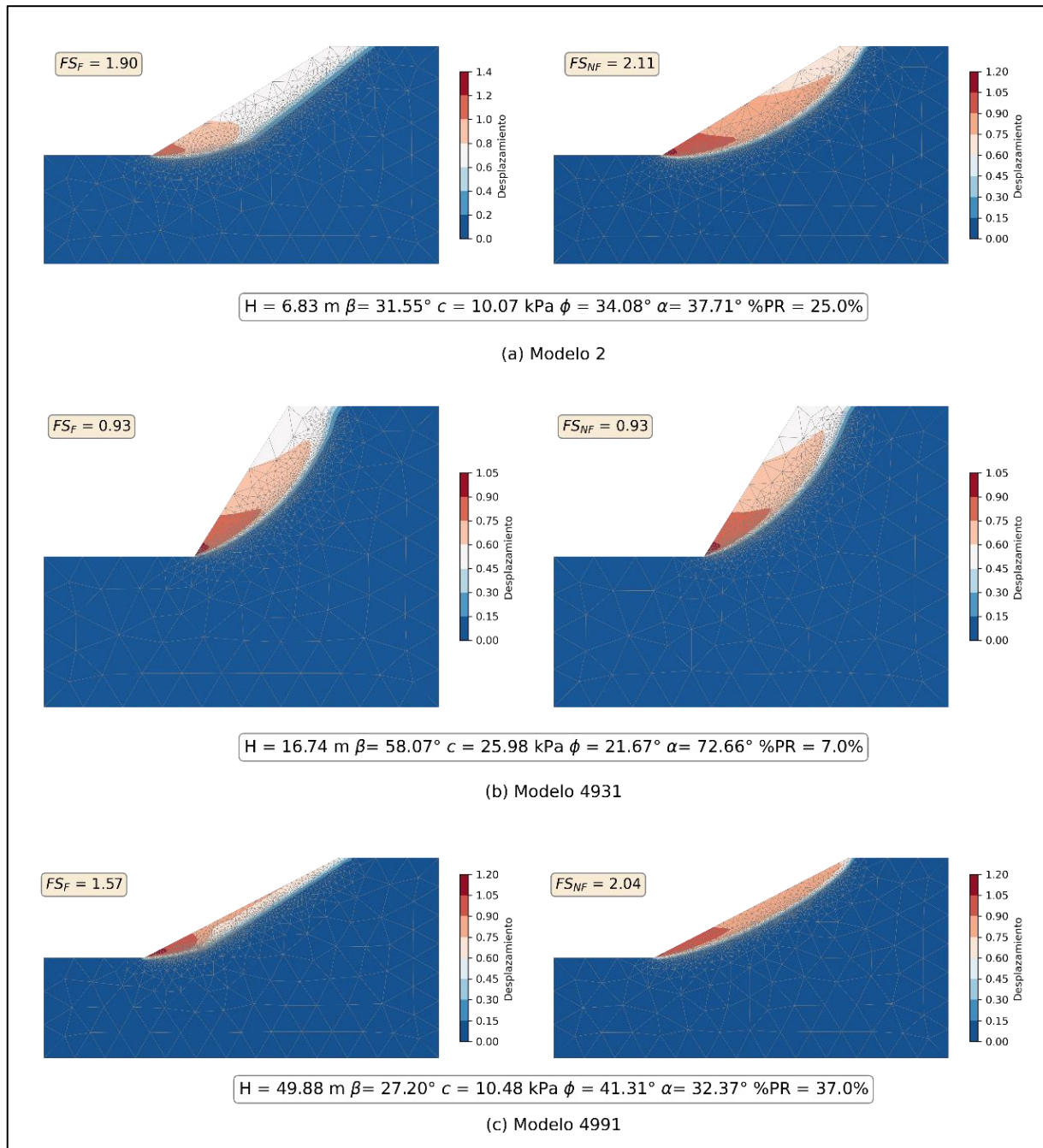


Figura 11. Superficie de falla de modelos fisurados (izquierda) y no fisurados (derecha), con ángulo relativo entre $-25^\circ < \beta - \alpha < -5^\circ$. (a) Modelo 2 con reducción del FS del 10%, (b) Modelo 4931 con reducción del FS del 0% y (c) Modelo 4991 con reducción del FS del 23%.

En la Figura 12 se presentan las superficies de falla para los ángulos relativos $-5^\circ < \beta - \alpha < 50^\circ$. El caso fisurado del modelo 17 (Fig. 12a) presenta una superficie de falla mixta que es plana al pie del talud, donde concentra las mayores deformaciones, y se vuelve circular hacia la corona de este. Por el contrario, el caso no fisurado presenta una única superficie de falla circular. Por su parte, el modelo 4980 (Fig. 12b) presenta condiciones similares al modelo anterior, ya que presenta una superficie de falla mixta para el caso fisurado y circular para el caso no fisurado, concentrando las deformaciones al pie del talud. Para los modelos 17 y 4980 existe una alta reducción del factor de seguridad. Por último, para el modelo 4983 (Fig. 12c) se presenta una superficie de falla circular para el caso fisurado y no fisurado, sin mayores diferencias en las deformaciones.

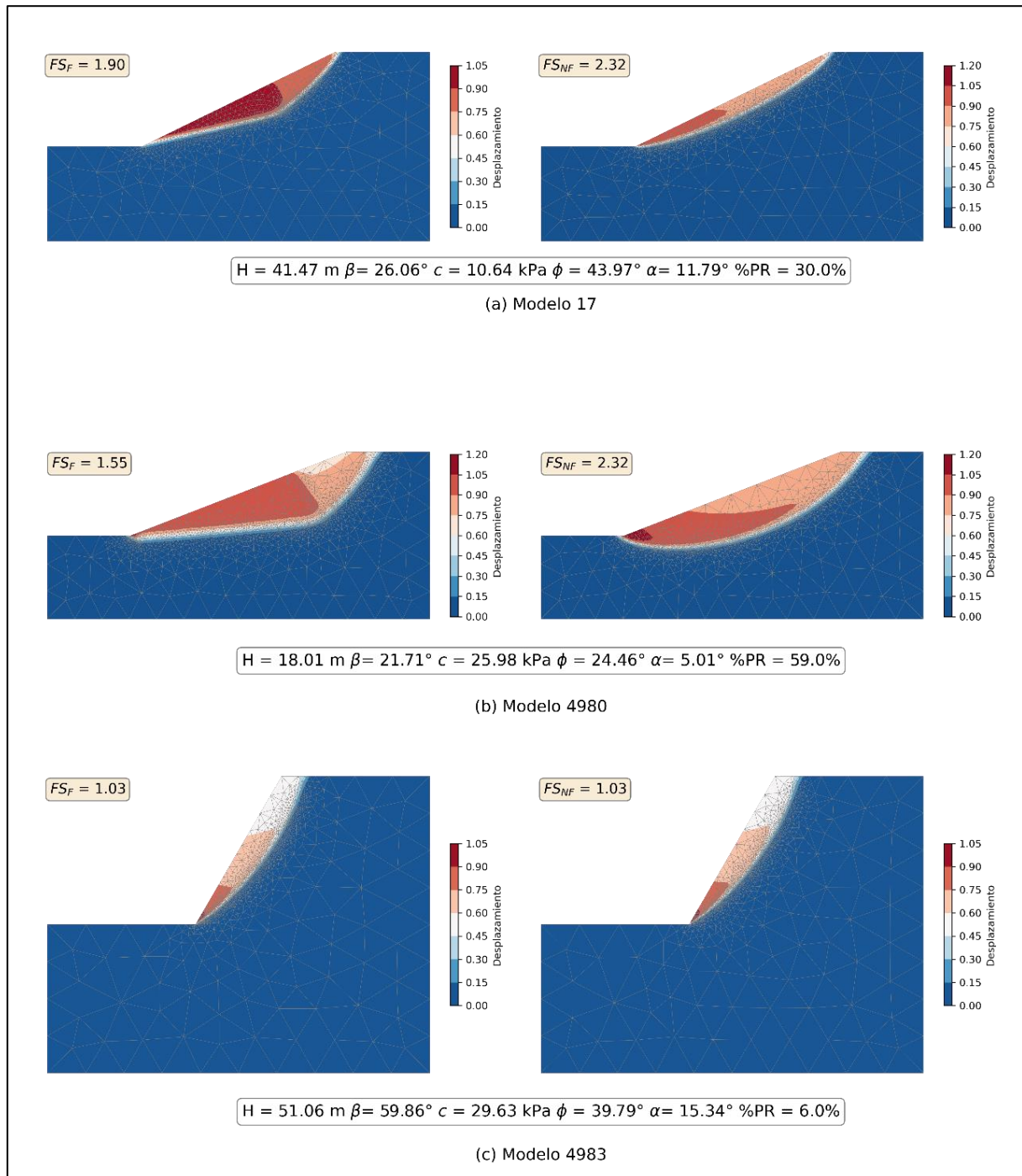


Figura 12. Superficie de falla de modelos fisurados (izquierda) y no fisurados (derecha), con ángulo relativo entre $-5^\circ < \beta - \alpha < 50^\circ$. (a) Modelo 17 con reducción del FS del 18%, (b) Modelo 4980 con reducción del FS del 33% y (c) Modelo 4983 con reducción del FS del 0%.

En la Figura 13 se presentan las superficies de falla para los ángulos relativos $\beta - \alpha > 50^\circ$. Del modelo 129 (Fig. 13a) se puede decir que en caso fisurado presenta una superficie de falla mixta que es plana al pie del talud donde concentra las mayores deformaciones y se vuelve circular hacia la corona de este, mientras que pasa el caso no fisurado se presenta una única superficie de falla circular. Por su parte, el modelo 4938 (Fig. 13b) presenta una superficie de falla circular tanto para el caso fisurado como para el caso no fisurado, concentrando las deformaciones al pie del talud. Por último, para el modelo 4959 (Fig. 13c) se presentan condiciones similares al modelo anterior.

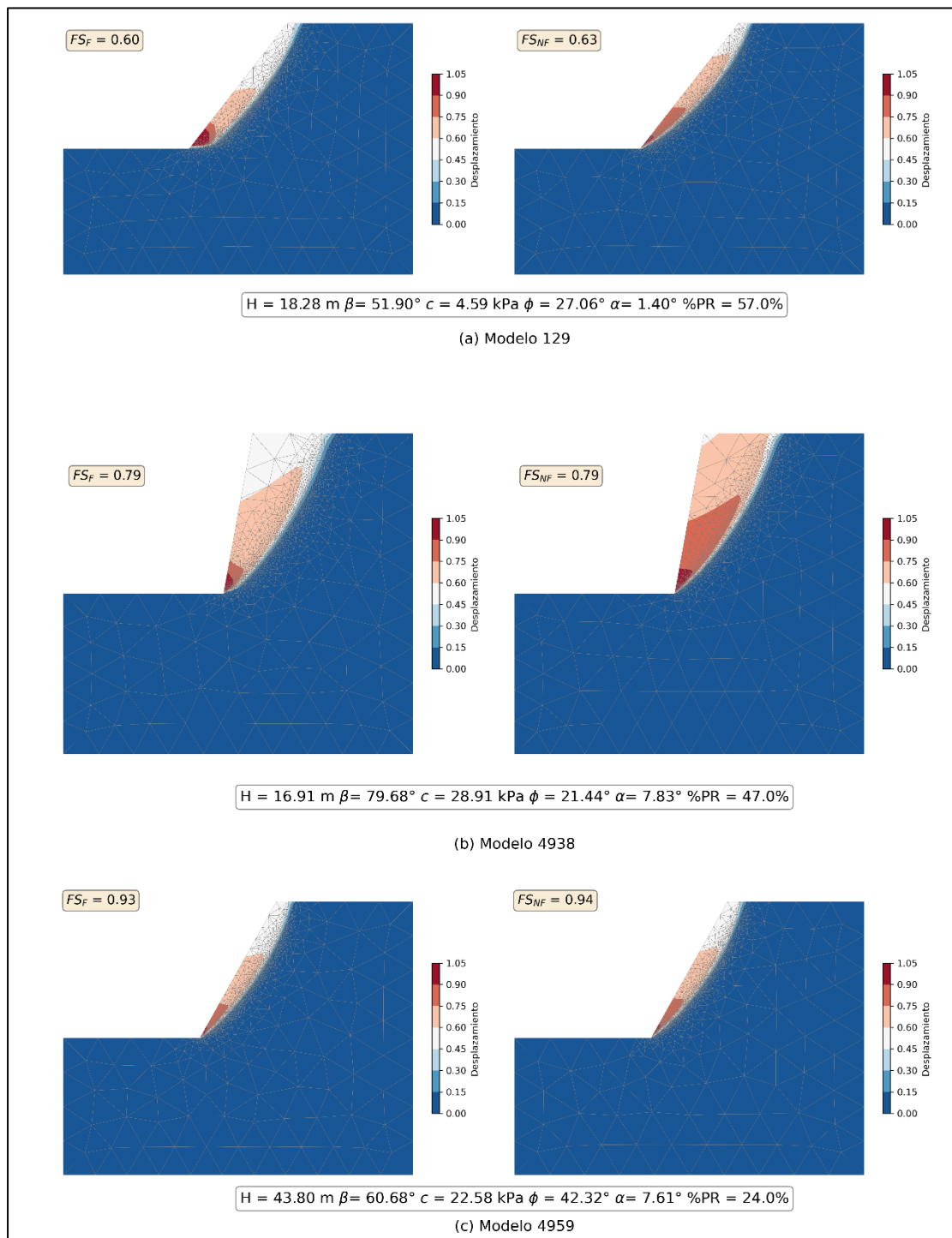


Figura 13. Superficie de falla de modelos fisurados (izquierda) y no fisurados (derecha), con ángulo relativo $\beta - \alpha > 50^\circ$. (a) Modelo 129 con reducción del FS del 5%, (b) Modelo 4938 con reducción del FS del 0% y (c) Modelo 4959 con reducción del FS del 1%.

3.3. Discusión

De acuerdo con lo observado durante el desarrollo de esta investigación, la herramienta computacional basada en el Método de Elemento Finitos permite modelar y diseñar taludes mediante un modelo geotécnico en base al modelo fisurado para suelos residuales graníticos donde se consideren planos de debilidad presentes en estos tipos de suelo. Además, de acuerdo con lo señalado por Awruch et al. (2011), la utilización del Método de Elementos Finitos permite reducir el tiempo de trabajo de manera notable y entregar resultados confiables y precisos. Lo anterior en desmedro de la realización de un análisis de Equilibrio Límite, ya que tal como plantea Aguilar y Zúñiga (2015), este tipo de análisis pueden considerarse poco realistas al no considerar la distribución de presiones ni deformaciones y ya que utilizan modelos de falla sencillos. De esta manera, según las características de los suelos residuales (Cabrera, 2007; Wesley, 2010; Villalobos, 2011; Blight, 2012) y a los resultados obtenidos, las condiciones de anisotropía se pueden ver representadas en la distribución de las deformaciones y superficies de fallas resultantes.

Por otro lado, de acuerdo con lo observado en la Figura 4, se pueden establecer seis condiciones diferentes en lo que respecta a las reducciones del FS según el ángulo relativo talud – fisura, donde podemos encontrar dos máximos y dos mínimos. La primera corresponde a aquellas donde $\beta - \alpha$ corresponde a diferencias menores a -125° obteniéndose reducciones del FS que no superan el 20%. En segundo lugar, en taludes con $-125^\circ < \beta - \alpha < -80^\circ$ es posible encontrar el primer mínimo donde las reducciones del FS que no superan el 10%. En tercer lugar, para taludes cuyo ángulo relativo talud - fisura ($\beta - \alpha$) esté entre -80° y -25° las reducciones del FS alcanzan el primer máximo alcanzando valores de hasta un 60% aproximado. En cuarto lugar, para taludes con $-25^\circ < \beta - \alpha < -5^\circ$ las reducciones del FS en su mayoría no superan el 20% (segundo mínimo), sin embargo, existen casos puntuales donde estas reducciones podrían llegar a tener valores de hasta un 50%. En quinto lugar, se tiene el segundo máximo, el que hace referencia a taludes cuyo ángulo relativo talud – fisura está entre los -5° y los 50° , donde las reducciones del FS alcanzan hasta el 60%. Por último, para taludes con un $\beta - \alpha > 50^\circ$, se tienen reducciones del FS menores al 20%. De este modo, según estos resultados y de acuerdo con la Figura 6 se puede establecer que las mayores reducciones de resistencia del talud ocurren para valores bajos e intermedios de cohesión y ángulo de fricción ($C_F < 15\text{kPa}$ y $\phi_F < 15^\circ$), donde se alcanzan reducciones de hasta el 60%. A continuación, en la Tabla 2 se presenta un resumen de lo mencionado anteriormente.

Tabla 2. Resumen del tipo de superficie de falla para el caso fisurado según el valor de $\beta - \alpha$.

Rango ($\beta - \alpha$)	Tipo de Superficie de Falla Mixta
$\beta - \alpha < -125^\circ$	Plana al pie del talud, circular en la corona
$-125^\circ < \beta - \alpha < -80^\circ$	Plana en la corona del talud, circular al pie
$-80^\circ < \beta - \alpha < -25^\circ$	Plana en la corona del talud, circular al pie
$-25^\circ < \beta - \alpha < -5^\circ$	Plana en la corona del talud, circular al pie
$-5^\circ < \beta - \alpha < 50^\circ$	Plana al pie del talud, circular en la corona
$\beta - \alpha > 50^\circ$	Plana al pie del talud, circular en la corona

En base a lo anterior, se destaca que las fisuras influyen por sobre el tipo de superficie de falla según sea el ángulo relativo del talud y, asimismo, en las reducciones del factor de seguridad. Wesley (2009), señala que es poco probable que las fallas de taludes en suelos residuales con pendientes pronunciadas sean fallas circulares profundas. De esta manera, según lo observado entre las Figuras 8 y 13 y a lo expuesto en la Tabla 2, para esta investigación lo anterior se condice por completo para los casos no fisurados, sin embargo, para el caso fisurado se presentan superficies de falla mixta teniendo en algunos casos una profundidad considerable. Esto se puede explicar debido a la inclusión de heterogeneidades (estructuras heredadas) presentes en los suelos residuales para la modelación de taludes en el caso fisurado, donde el rol de las fisuras está determinado según su influencia en la formación de las superficies de falla dada su orientación. Del mismo modo, Hsu et al. (2019), señala que las superficies de falla para taludes en roca blanda (meteorizada) corresponden a planos circulares siendo la orientación de las discontinuidades presentes un factor preponderante al momento de producirse dicha superficie de falla.

Por último, según lo observado a partir de las modelaciones realizadas, se entiende que la geometría del talud (altura e inclinación) corresponde a un factor fundamental al momento de evaluar su estabilidad. Considerando la modelación fisurada y no fisurada, es posible determinar que existen taludes que permanecen en condiciones de estabilidad aun teniendo un ángulo de inclinación (β) mayor a 45° , tal como lo explica Wesley (2011). Por su parte, Pain et al. (2014) señala que la orientación de las discontinuidades, su inclinación y espaciamiento tienen gran influencia en la estabilidad del talud. De esta manera, se entiende que la inclusión de fisuras en el modelado y diseño de taludes resulta fundamental para estimar la resistencia del material de acuerdo con la determinación del factor de seguridad, tal como se aprecia en las comparaciones realizadas para los modelos fisurados y no fisurados entre las figuras 8 y 13. Del mismo modo, y de acuerdo con lo expuesto por Wesley (2011), la no inclusión de fisuras y de condiciones freáticas pueden conllevar a realizar una evaluación de la estabilidad deficiente de un talud sobreestimando su Factor de Seguridad y la resistencia del material debido a que no se tienen en cuenta las condiciones in situ.

4. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones que se pueden establecer a partir del trabajo realizado en la presente investigación:

- La utilización de herramientas computacionales permite reducir los tiempos de trabajo de manera notable, agilizando la generación de las simulaciones de los modelos fisurados y no fisurados para su posterior comparación.
- De acuerdo con las reducciones del factor de seguridad presentadas en las Figuras 4 y 5, se puede establecer que la influencia de las discontinuidades se produce en mayor medida para casos donde el ángulo relativo varía entre $-5^\circ < \beta - \alpha < 50^\circ$, y en menor medida para casos donde el ángulo relativo varía entre $-80^\circ < \beta - \alpha < -25^\circ$.
- Para modelos fisurados se reconocen superficies de falla mixtas, en las que se pueden encontrar secciones planas y circulares, ya sea al pie del talud o en su coronación. De esta manera, se tienen dos grupos: falla plana en coronación y circular en pie del talud, y falla circular en coronación y plana en pie del talud. Por su parte, para modelos no fisurados se tiene que las superficies de falla corresponden a fallas circulares según lo observado en los modelos comparados.
- Por último, la existencia de fisuras en la estructura de un talud afecta en gran medida a la estabilidad de este según la inclinación de estos planos de inestabilidad. Es por esta razón, que se recomienda realizar estudios específicos para distintos taludes in situ, considerando condiciones freáticas, esfuerzos sísmicos y externos, ya que el presente estudio aborda este problema desde un punto de vista general para taludes de suelo residual granítico.

5. REFERENCIAS

- Agam, M.; Hashim, M.; Murad, M.; Zabidi, H.** (2016). Slope Sensitivity Analysis using Spencer's Method in Comparison with General Limit Equilibrium Method. *Procedia Chemistry*, 19, 651–658. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.066>
- Aguilar, O.; Zúñiga, C.** (2015). *Análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite aplicado a taludes o laderas adenañas al Cerro de la Copa, casco urbano de Cartagena*. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad de Cartagena.
- Beneyto, P.; Gutiérrez, G.; Mroginski, J.; Di Rado, H.; Awruch, A.** (2011). Análisis de estabilidad de taludes mediante técnicas de optimización heurística. *Mecánica Computacional*, XXX, 2001-2004. Asociación Argentina de Mecánica Computacional.
- Blight, G.E.** (2012). *Mechanics of Residual Soils, Second Edition*. Nueva York, Estados Unidos, CRC Press.
- Bravo-Zapata, M.F.; Muñoz, E.; Lapeña-Mañero, P.; Montenegro-Cooper, J.M.; King, R.W.** (2022). Analysis of the Influence of Geomechanical Parameters and Geometry on Slope Stability in Granitic Residual Soils. *Applied Sciences*, 12, 5574. <https://doi.org/10.3390/app12115574>
- Cabrera, T.** (2007). *Características geotécnicas de los suelos residuales del Batolito de la Cordillera de la Costa*. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad de Chile.
- Coutinho, R.Q.; Silva, M.M.; dos Santos, A.N.; Lacerda, W.A.** (2019). Geotechnical Characterization and Failure Mechanism of Landslide in Granite Residual Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(8), Art. 8.
- Davis, E.H.** (1980). Some Plasticity Solutions Relevant to the Bearing Capacity of Rock and Fissured Clay. *Geomechanics*, 3, 27-36. Wellington, Nueva Zelanda.
- Dawson, E.M.; Roth, W.H.; Drescher, A.** (1999). Slope stability analysis by strength reduction. *Géotechnique*, 49(6), 835-840.
- Dearman, W. R.; Baynes, F. J.; Irfan, T. Y.** (1978). Engineering Grading of Weathered Granite. *Engineering Geology*, 12, 345-374.
- Fernández, W.** (2018). *Evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en suelo residual de roca granítica mediante Simulación de Monte Carlo*. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Flandes, N.** (2017). *Estudio de la relación entre meteorización y características geomecánicas de la roca granítica de Concepción*. [Tesis de pregrado y magíster inédita]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Heidemann, M.; Bressani, L. A.; Flores, J. A.** (2021). Influence of faults on alteration, mineralogy, and geotechnical behavior of granitic residual soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(9). <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02351-x>
- Hosni, T.; Berga, A.** (2016). Slope Stability Analyzes with Fissured Material. *IASET: Journal of Civil*, 1, 35-44. International Academy of Science, Engineering and Technology.
- Hsu, S.C.; Hsieh, T.P.; Tsai, P.H.** (2019). Influence of material spatial variability on slope stability in soft rock. *IOP Publishing*, 615, 012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/615/1/012044>
- INE.** (2018). *Síntesis de resultados Censo 2017*. Santiago: Instituto Nacional de Estadísticas.
- Krabbenhoft, K.; Lyman, A.; Krabbenhoft, J.** (2016). *Optum G2: Analysis*. Windows. Copenhagen: Optum Computational Engineering.
- Liu, X.; Zhang, X.; Kong, L.; Yin, S.; Xu, Y.** (2022). Shear Strength Anisotropy of Natural Granite Residual Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002709](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002709)
- MOP – Dirección de Vialidad.** (2021). *Manual de Carreteras*. Ministerio de Obras Públicas.

- Morales, F.; King, R.; Villalobos, S.** (2019). *Evaluación de la estabilidad de taludes en roca usando método de elementos finitos (FEM) y redes de fracturas discretas (DFN)*. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Niu, X.; Xie, H.; Sun, Y.; Yao, Y.** (2017). Basic Physical Properties and Mechanical Behavior of Compacted Weathered Granite Soils. *International Journal of Geomechanics*, 17(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000983](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000983)
- Pain, A.; Kanungo, D.P.; Sarkar, S.** (2014). Rock slope stability assessment using finite element based modelling-examples from the Indian Himalayas. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 9, 215-230. <https://doi.org/10.1080/17486025.2014.883465>
- Rodríguez, P.** (2015). *Caracterización geomecánica y mineralógica del maicillo en la cordillera de Nahuelbuta*. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Sanhueza, C.; Rodríguez, L.** (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la Construcción*, 12(1), 17-29. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100003>
- Sloan, S.W.** (1989). Upper bound limit analysis using finite elements and linear programming. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 13, 263-282. <https://doi.org/10.1002/nag.1610130304>
- Sloan, S.W.** (1988). Lower bound limit analysis using finite elements and linear programming. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 12, 61-77. <https://doi.org/10.1002/nag.1610120105>
- Townsend F. C.** (1985). Geotechnical Characteristics of Residual Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:1\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:1(77))
- Viana Da Fonseca, A.; Carvalho, J.; Ferreira, C.; Santos, J.; Almeida, F.; Pereira, E.; Feliciano, J.; Grade, J.; Oliveira, A.** (2006). Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 1307-1348. <https://doi.org/10.1007/s10706-005-2023-z>
- Villalobos, F.** (2014). *Mecánica de Suelos*. Concepción, Chile. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Villalobos, S.** (2011). *Análisis y diseño de una excavación apornada en un suelo residual de Concepción*. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Wesley, L.** (2009). Behaviour and geotechnical properties of residual soils and allophane clays. *Obras y Proyectos*, 6, 5-10.
- Wesley, L.** (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils*. Hoboken, Estados Unidos, Wiley.
- Wesley, L.** (2011). Stability of slopes in residual soils. *Obras y Proyectos*, 47-61. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132011000200005>
- Zheng, X.; Booker, J.P.; Carter, J.P.** (1998). Limit analysis of the bearing capacity of fissured materials. *Elsevier Science*, 37, 1211-1243. *International Journal of Solids and Structures*.