

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El moderno desarrollo de las actuales vías de comunicación, tales como caminos y ferrocarriles, han puesto al diseño y construcción de taludes en un plano de importancia ingenieril de primer orden.

Con la expansión de las carreteras, ferrocarriles, provocaron los primeros intentos para realizar un estudio racional en este campo, pero no fue así hasta la llegada de la Mecánica de suelos, cuando fue posible aplicar el diseño de taludes, normas y criterios.

Estas normas y criterios apuntan directamente a la durabilidad del talud y a su vez, a su estabilidad a lo largo del tiempo.

La presente tesis, tiene antecedentes de haber sido realizada en el ámbito investigativo, como tema de maestrías, titulación de grado, realizando estudios y comparaciones en los países de España, Perú, Argentina, Venezuela, Ecuador, Cuba, etc. Dando resultados positivos en el estudio de análisis de estabilidad de taludes con el programa Geo/Slope.

Lo que se propone, es analizar la estabilidad de taludes dentro de una zona de estudio Padcaya-Río Negro, de aproximadamente 34 km de longitud.

Identificando y seleccionando los taludes más relevantes del tramo. Para su posterior caracterización del suelo y su análisis de estabilidad, utilizando el programa Geo/Slope.

La presente tesis, contiene una metodología novedosa para la aplicación ingenieril, que contiene varios métodos de análisis de estabilidad de taludes, bajo el criterio de equilibrio límite y que es de fácil interpretación y determinación del factor de seguridad del talud.

Entre su listado de análisis, podemos mencionar el método de Morgenstern-Price, Spencer, Bishop, Janbu y el método Fallenius ordinario.

Esta aplicación práctica, tiene un gran aporte a las vías de comunicación, nos permite conocer el estado y condiciones que se presentara en el momento de la construcción de carreteras.

1.2. Antecedentes

En el tramo carretero Padcaya – Río Negro se han presentado una serie de problemas de deslizamiento de taludes tanto artificiales como taludes naturales, que existen a lo largo del tramo inhabilitando el paso. Y ocasionando pérdidas económicas al departamento. Además de poner en riesgo la circulación vehicular como también peatonal. Por esta razón se ve la necesidad de analizar la estabilidad de taludes en el tramo mencionado.

Los antecedentes que presenta esta área de estudio, de deslizamiento de masas como se menciona en el párrafo anterior son constantes por los diferentes tipos de fallas que presentan los taludes. Y en época de lluvia es más susceptible a que incurra este suceso.

En la siguiente figura podemos observar la magnitud de perjuicio y pérdidas económicas como también podemos mencionar el riesgo de pérdidas humanas a causa de este fenómeno de desequilibrio de masas de un talud.

Figura 1.1. Deslizamiento de talud en la localidad de Guayabillas



Fuente: Periódico El País

En fecha 28 de marzo de 2023, según el reporte y las imágenes de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), se hubiese producido un deslizamiento de magnitud, a causa de las constantes lluvias, en el mítico sector de la Galería del Angosto de Villa montes y también contiguo sector del Volcán Colorado, una parte de la ruta entre Tarija-Villa Montes y que conecta con Santa Cruz. La cual es muy utilizada por el transporte de carga y de pasajeros que ahora se ven afectados.

Figura 1.2. Reporte de condición de la ruta Tarija-Villa Montes

<p>Estado: D – NO TRANSITABLE, TRAFICO CERRADO</p> <p>Sección: La central-San Antonio (Villamontentes)</p> <p>Evento: Derrumbe</p> <p>Clima: Lluvioso, todo el día</p> <p>Horario de corte: Hasta nuevo aviso</p> <p>Tipo de carretera: Carretera asfaltada</p> <p>Alternativas de circulación o desvíos: Existen desvíos alternos</p> <p>Restricción vehicular: No circular, todo tipo de vehículos</p> <p>Sector: Sector volcán colorado y la galería progresiva 183+000 al 190+300</p> <p>Trabajos de conservación vial: mantenimiento de la vía con equipo pesado</p> <p>Latitud: -21.2291000</p> <p>longitud: -63.5723300</p>
--

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras (ABC)

Figura 1.3. Deslizamiento sector Angosto ruta Tarija-Villa Montes



Fuente: Periódico El Chaco

1.3. Situación problemática

La estabilidad de taludes hace que se investigue sobre los materiales o tipo de suelo que existe dentro del campo de estudio. En este caso, en el departamento de Tarija provincia José María Avilés carretera Padcaya – Río Negro, que consiste en determinar y analizar su factor de seguridad y proponer medidas de protección superficial, utilizando mallas metálicas, gunitado de taludes (hormigón proyectado a presión), construcción de muros de revestimiento, implantación de materiales geotextiles, impermeabilización entre otros.

Una carretera, es una obra vial de transporte de dominio y uso público, proyectada y construida fundamentalmente para la circulación de vehículos.

El tramo Padcaya - Río Negro, es parte de la red fundamental de la ciudad de Tarija con Bermejo. Durante su recorrido, se puede observar mucha variación de suelo, y a su vez desmoronamiento de materiales granulares y cobertura vegetal, dispersados en las cunetas y plataforma de la carretera, produciendo inseguridad y perjuicio para los viajantes.

Si esta situación de inestabilidad de taludes en la carretera Padcaya– Río negro, no se llega a dar una solución puede ocurrir mayores consecuencias como ser, deslizamientos de gran magnitud, ocasionando problemas económicos y sociales, afectando el libre tránsito de los vehículos, dañando la plataforma y sobre todo produciendo pérdidas humanas.

Figura 1.4. Deslizamiento presentado en la carretera Padcaya-Río negro



Fuente: Periódico El País

1.3.1. Problema

¿Cómo determino el factor de seguridad en taludes mediante el modelamiento en el programa Geo/Slope?

1.3.2. Relevancia y factibilidad del problema

Se pretende realizar los análisis del programa de estabilidad de taludes Geo/Slope, donde nos permitirá conocer su comportamiento de dicho talud, conocer su punto crítico y así poder realizar estudios para tomar decisiones preventivas y evitar futuras fallas.

Para ello se pretende obtener muestras de los suelos estudiados, conocer los tipos de suelos que presentan, en el mismo laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Tanto para el levantamiento topográfico de los taludes, del gabinete de Topografía.

1.4. Delimitación

1.4.1. Temporal

El periodo de realización del presente estudio, se realizó a principio del año 2022, periodo que abarca desde la selección, extracción de muestra y desarrollo procesado en gabinete.

1.4.2. Espacial

La zona de estudio está ubicada en el departamento de Tarija, municipio Aniceto Arce, en

el tramo carretero Padcaya-Río Negro. Posee amplia cobertura, para realizar levantamientos topográficos y sus análisis de la extracción de muestras obtenidas, en el laboratorio de suelos de la (U.A.J.M.S) con el fin de analizar el programa de estabilidad de taludes Geo/Slope en gabinete.

1.5. Justificación

Las intervenciones no invasivas en el medio ambiente han cobrado relevancia en las últimas décadas en los países desarrollados, vinculando profesionales que conforman grupos multidisciplinarios de estudio frente a problemáticas consideradas corrientes en años pasados, por ejemplo, la construcción de un camino. Los impactos negativos de las intervenciones en el suelo cuando se realizan construcciones viales son: Daño superficial provocado por erosión y la inestabilidad del talud. La necesidad de optimizar la interacción de técnicas de control de erosión y de estabilización ha llevado a crear nuevas líneas investigativas, en busca de bases sólidas que permitan elegir soluciones sustentables desde el punto de vista técnico, económico y armónico al entorno, que protejan el talud de ambos aspectos negativos.

Las carreteras de Bolivia generalmente sufren continuas interrupciones de tráfico debido a los deslizamientos de laderas y taludes, sea por un defectuoso diseño de los mismos o por un inadecuado y oportuno mantenimiento. El problema se agrava en las zonas donde las condiciones climáticas son rigurosas y las características de los suelos poco favorables a su estabilidad. Este fenómeno obliga a la necesidad de realizar costosas reconstrucciones luego de haber sufrido numerosas y periódicas interrupciones de tráfico, accidentes graves y el consecuente incremento económico en la operación vehicular. Una rehabilitación o mantenimiento puede llegar a ser más costosa que la construcción de taludes perfectamente estudiados y diseñados.

En la actualidad se trata de comparar técnicas nuevas, soluciones de estabilización, con las tradicionales, que no se suelen adoptar en los estudios de taludes. La innovación consiste esencialmente en aportar un análisis de un programa para la estabilización de taludes Geo/Slope, con los que se pueda conservar los taludes de carreteras y de obra civil en general, de forma más eficaz, técnica y económicamente, que las que se aplican actualmente.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Analizar el programa Geo/Slope aplicando a los taludes del tramo Padcaya-Río Negro, realizando modelaciones en cada uno de ellos, para obtener el factor de seguridad de cada talud.

1.6.2. Objetivos específicos

- Identificar los puntos críticos en el tramo.
- Realizar la caracterización de las muestras obtenidas.
- Hacer levantamientos topográficos de cada sección.
- Ejecutar la modelación y verificación del factor de seguridad de los taludes.
- Desarrollar cálculos de forma manual para obtener el factor de seguridad
- Comparar el factor de seguridad del talud con diferentes métodos de análisis.
- Elaborar un manual de uso del programa.

1.7. Unidad de estudio y decisión muestral

1.7.1. Unidad de estudio

- Geométrico

La unidad de estudio son las secciones transversales de los taludes mediante levantamiento topográfico.

- Perfiles
- Muestreo

Para la realización de la siguiente tesis se hará un muestreo probabilístico. El cual se realizará en diferentes perfiles de diferentes materiales granulares.

1.7.2. Población

Taludes de la carretera Padcaya – Río Negro que se encuentren en riesgo de inestabilidad.

Tabla 1.1. Nivel de confianza

Nivel de confianza %	Valor del nivel de confianza Z
50	0,574
80	1,28
85	1,444
90	1,64
95	1,96
99	2,68

Fuente: Elaboración propia

El nivel de confianza de la presente tesis se contempla de acuerdo al número de taludes a realizar para elaborar un modelo probabilístico, el cual tenga un nivel de confianza mínima del 95%.

1.7.3. Muestra

Taludes analizados.

$$n = \frac{N * Z^2 * \sigma^2}{(N + 1)e^2 + Z^2 * \sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma(x - X)^2}{N - 1}}$$

Para variable cuantitativa

Donde:

Población N = 30

Valor de nivel de confianza Z = 1,96

Nivel de confianza N. C = 95%

Desviación estándar $\sigma = 4,26\%$

Error de tolerancia (generalmente) e = 3,28%

Muestra n = 5,48

Tabla 1.2. Resumen a realizar

Muestra	
Taludes en estudio	5

Fuente: Elaboración propia

1.7.4. Selección de las técnicas de muestreo

Es el Muestreo Estratificado

1.8. Métodos y técnicas empleadas

Para el análisis del programa de estabilidad de taludes Geo/Slope. aplicando al tramo Padcaya-Río Negro; se debe realizar varios tipos de ensayos, que si son factibles dentro del laboratorio de suelos y pueden realizarse ya que se cuenta con los medios necesarios.

1.8.1. Métodos

1.8.1.1. Listado de actividades a realizar

Selección del material para su caracterización

Caracterización de los agregados

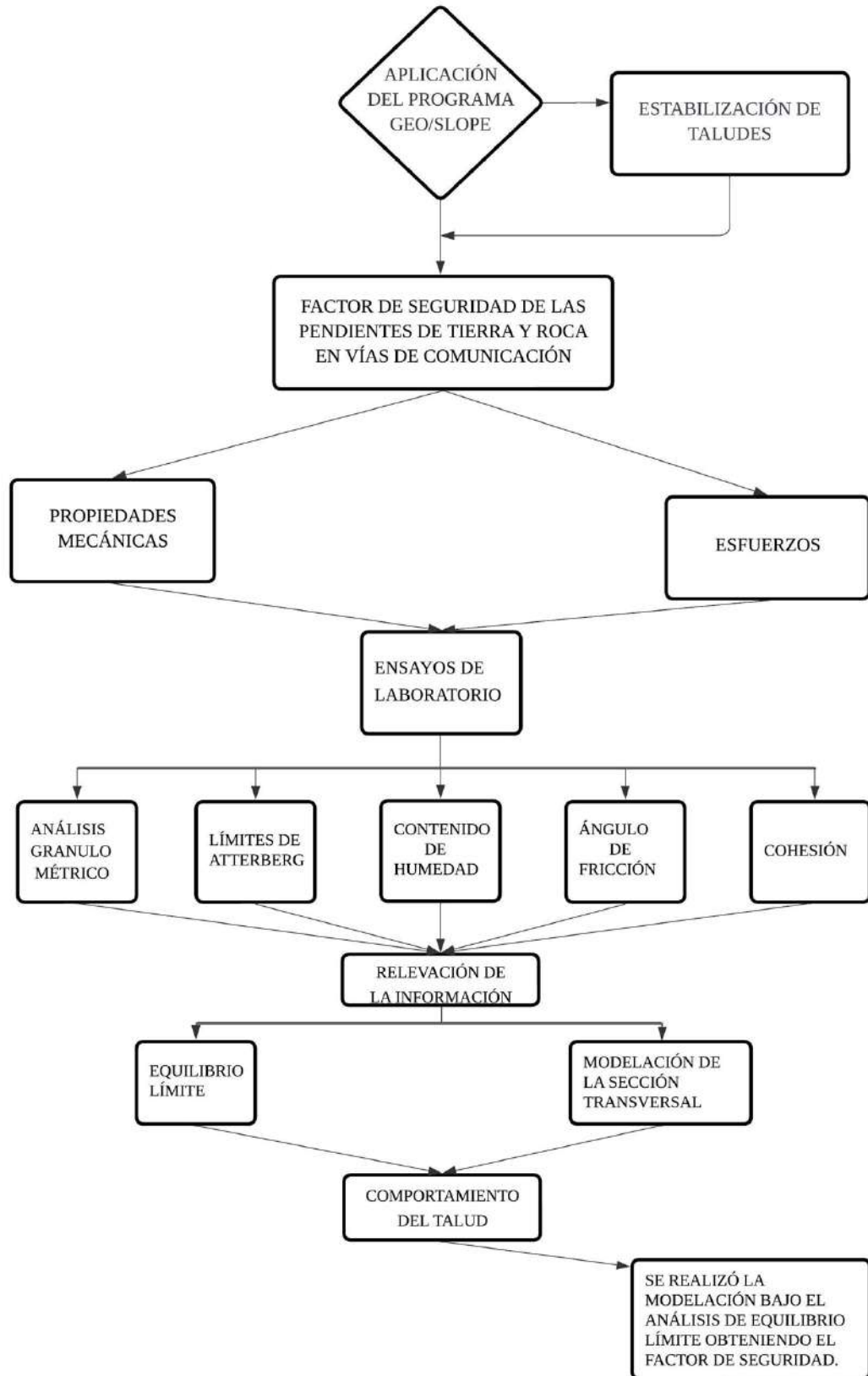
- Contenido de humedad
- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Peso específico
- Ensayo esfuerzo de corte
- Ángulo de fricción

Gabinete

- Levantamiento topográfico de sección
- transversales de los taludes

1.8.2. Técnicas

1.8.2.1 Esquema de actividades en función a la perspectiva



1.9. Procesamiento de la información

- Recopilación y procesamiento de la información obtenida.
- Tabulación de los resultados adquiridos, manejo de la información.
- Representación gráfica, para la interpretación de los resultados.

1.10. Alcance del estudio

Mediante el presente estudio, se pretende analizar el programa de estabilidad de taludes Geo/Slope aplicando al tramo Padcaya-Río Negro, en los 5 taludes identificados, para su respectiva extracción de muestras representativas de las tres partes del talud; pie, cuerpo y cabeza, obteniendo la caracterización de suelos y levantamiento topográficos, mediante ensayos en el laboratorio de suelos y de topografía de la (U.A.J.M.S). Posteriormente, determinar el factor de seguridad de cada talud bajo diferentes métodos de análisis, basado en el principio del equilibrio límite como ser Bishop, Spencer, Morgenstern-Price, Janbu, Janbu generalizado y Fallenius.

Se pretende empezar a utilizar nuevas alternativas de análisis computarizados con años de desarrollo y verificaciones en el uso. Con el fin de optimizar tiempo y de una manera confiable.

CAPÍTULO II

INDICADORES GENERALES

DE LOS TALUDES (ESFUERZO-DEFORMACIÓN)

Y SU ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

2.1. Indicadores, antecedentes y potenciales de áreas propensas a movimiento en masa en laderas

Nos permite identificar y localizar las áreas inestables y las potencialmente inestables.

2.1.1. Indicadores antecedentes

La serie de cambios que se generan en la geomorfología del relieve de ladera debido a la remoción en masas, nos permiten detectar aquellas zonas que han sido afectadas por un tipo de fenómeno. Estos indicadores se pueden observar directamente sobre el terreno, son denominados así porque nos indican las zonas que ya han sido afectadas por recurrencia de eventos anteriores. ((INDECI), 2011)

2.1.2. Indicadores potenciales

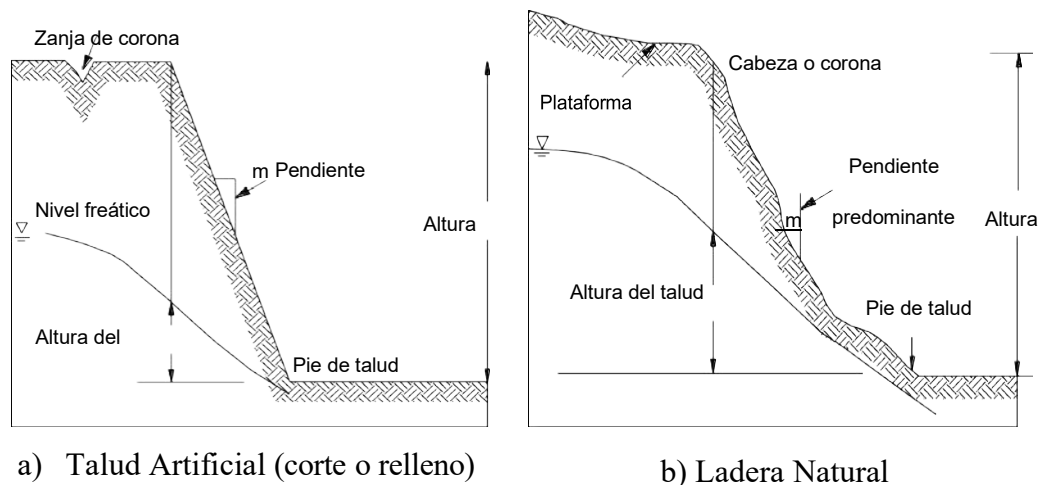
Tipo de indicadores que nos permiten identificar áreas que posiblemente no han sido afectadas por remoción en masas en laderas, pero en las cuales el terreno presenta alguna característica que las hace potencialmente inestables. Generalmente se basa en el análisis de los factores condicionantes relacionados con la litología la estratigrafía, la geomorfología y la cercanía a fallas o fisuras progresivas de los macizos rocosos.

A partir de los factores condicionantes y desencadenantes los cuales ligados a los indicadores anterior antecedentes, como análisis de los eventos ocurridos en el pasado, la recurrencia, los efectos causados y otros que, se pueden observar directamente sobre el terreno o mediante data histórica y los indicadores potenciales que nos permiten identificar zonas que no han sido afectadas por remoción de masas en laderas, pero las cuales de acuerdo a los factores condicionantes que presenta el terreno las hace potencialmente inestables, nos permitirá predecir un probable comportamiento de un futuro evento. ((INDECI), 2011)

2.2. Talud

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente. (Suárez Díaz, 2012, pág. 3)

Figura 2.1. Partes generales de un talud o ladera



Fuente: Suárez, Jaime, Análisis Geotécnico pág. 3

2.3. Partes de un talud

Existen algunos términos para definir las partes de un talud. El talud comprende una parte alta o superior convexa con una cabeza, cima, cresta o escarpe, donde se presentan procesos de erosión; una parte intermedia semirrecta y una parte baja o inferior cóncava con un pie, pata o base, en la cual ocurren principalmente procesos de caída de material del talud. (Suárez Díaz, 2012, pág. 3)

2.3.1. Pie, pata o base

El pie corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera. La forma del pie de una ladera es generalmente cóncava. (Suárez Díaz, 2012, pág. 4)

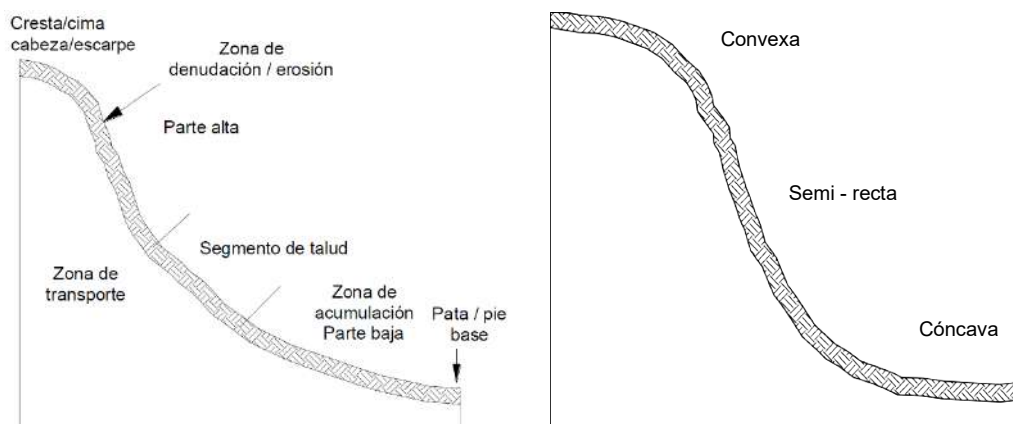
2.3.2. Cabeza, cresta, cima o escarpe

Cabeza se refiere al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera. Cuando la pendiente de este punto hacia abajo es semi vertical o de alta pendiente, se le denomina “escarpe”. Los escarpes pueden coincidir con coronas de deslizamientos. La forma de la cabeza generalmente es convexa. (Suárez Díaz, 2012, pág. 4)

2.3.3. Altura

Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza generalmente no son accidentes topográficos bien marcados. (Suárez Díaz, 2012, pág. 4)

Figura 2.2. Partes generales de un talud o ladera



a) Talud Artificial (corte o relleno)

b) Ladera Natural

Fuente: Suárez, Jaime, Análisis Geotécnico pág. 3

2.3.4. Altura de nivel freático

Es la distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua (la presión en el agua es igual a la presión atmosférica). La altura del nivel freático se acostumbra medirla debajo de la cabeza del talud. (Suárez Díaz, 2012, pág. 4)

2.3.5. Pendiente

Es la medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera. Puede medirse en grados,

en porcentaje o en relación m:1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo: $45^\circ = 100\% = 1H:1V$.

Los suelos o rocas más resistentes generalmente forman laderas de mayor pendiente y los materiales de baja resistencia o blandos, tienden a formar laderas de baja pendiente.

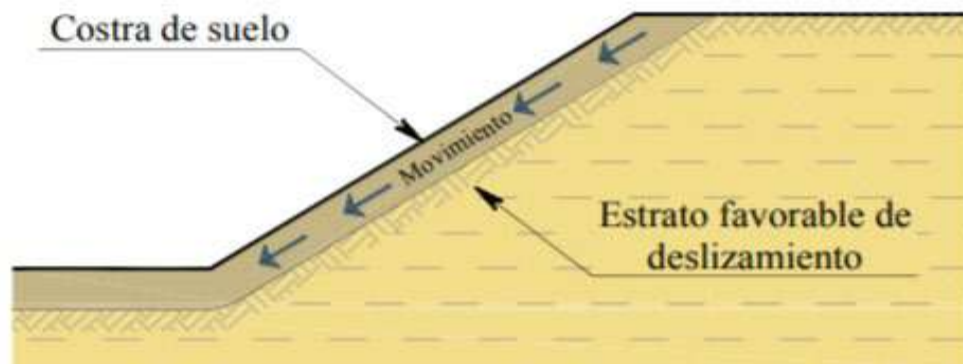
También existen otros factores topográficos en los taludes, los cuales se requiere definir, tales como: longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de la cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud. (Suárez Díaz, 2012, pág. 4)

2.4. Tipos de falla más comunes

2.4.1. Falla por deslizamiento superficial

Cualquier talud está sujeto a fuerzas naturales las mismas que pueden causar un deslizamiento en sus porciones de suelo, volviéndose más grave en la superficie inclinada del mismo a causa de la falta de presión normal confinante que allí existe. La inestabilidad puede producirse por un aumento en las cargas actuantes en la corona del talud, por una disminución en la resistencia del suelo al esfuerzo cortante. (Palate Bombón, 2018, pág. 10)

Figura 2.3. Falla por deslizamiento superficial



Fuente: Paredes, Jaime Alberto, (México, abril 2009) pág. 45

2.4.2 Deslizamiento en laderas naturales sobre superficies de falla preexistentes

Producido por un proceso de deformación bajo esfuerzos cortantes en partes más profundas, que llega muchas veces a producir una superficie de falla. Estos movimientos producidos por una estratigrafía favorable al proceso o flujos de agua en su interior son tan lentos que pueden pasar inadvertidos, hasta que el ingeniero intervenga en la zona, si los movimientos se aceleran se puede producir un deslizamiento de tierras. (Palate Bombón, 2018, pág. 10)

2.4.3. Falla por movimiento del cuerpo de talud

Iniciando con el movimiento superficial lento se puede producir uno tan brusco que puede afectar a gran masa del suelo, afectando a todo el cuerpo del talud. Se lo conoce también con el nombre de deslizamiento de tierras. Existen las fallas por rotación que define una superficie curva a lo largo de la cual ocurre el movimiento del talud y las fallas por traslación que ocurren a lo largo de las superficies débiles. (Palate Bombón, 2018, pág. 10)

Figura 2.4. Falla por movimiento del cuerpo del talud

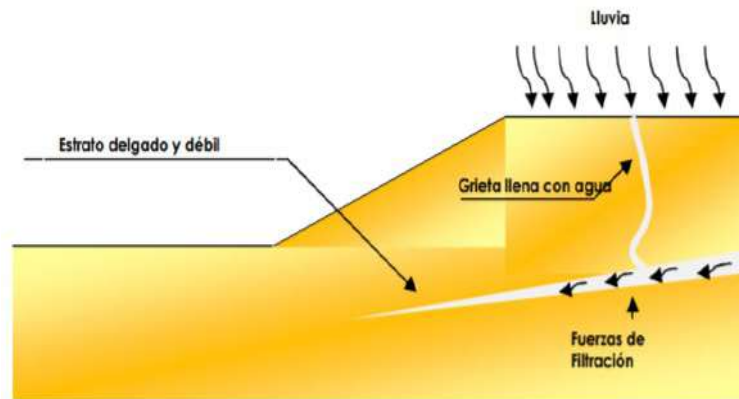


Fuente: Álvaro F. de Matteis, (2003 pág.7)

2.4.4. Falla por flujos

Consiste en los movimientos más o menos rápidos de zonas localizadas en una ladera natural, de manera que el movimiento asemeja el flujo de un líquido viscoso. Estas fallas pueden suceder en materiales secos y húmedos. (Palate Bombón, 2018, pág. 10)

Figura 2.5. Talud sometido a lluvia

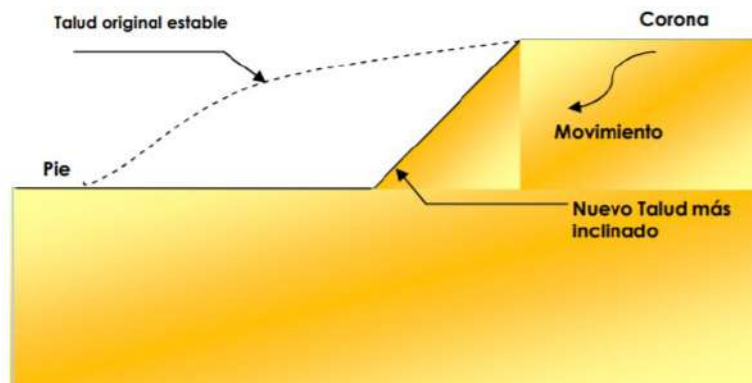


Fuente: Montoya, (2009) pág. 125

2.4.5. Fallas por erosión

Fallas de tipo superficial provocadas por arrastres de viento, agua, etc., en los taludes. Esta falla será más notoria cuanto más empinadas sean las laderas del talud. Una manifestación típica suele ser la aparición de irregularidades en el talud, originalmente uniforme. (Palate Bombón, 2018, pág. 10)

Figura 2.6. Variación de la geometría de un talud por erosión



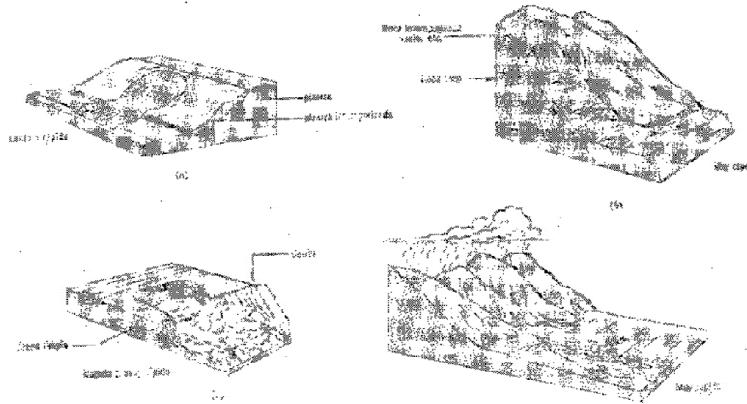
Fuente: Montoya, (2009) pág. 126

2.4.6. Falla por licuación

Ocurre cuando en la zona de deslizamiento el suelo pasa de una condición firme a la correspondiente a una suspensión, con una pérdida considerable de resistencia al esfuerzo

cortante. El fenómeno se puede dar en arcillas como en arenas poco compactadas. (Palate Bombón, 2018, pág. 11)

Figura 2.7. Falla por flujos de materiales húmedos



Fuente: Castañon, (1955) pág. 136

2.5. Factores que producen fallas de estabilidad

Con frecuencia las propias manipulaciones de ingeniero pueden ser fuente de graves problemas de estabilidad de taludes; la lista que se proporciona a continuación es una reseña de los procesos constructivos que comúnmente causan problemas: (Palate Bombón, 2018, pág. 11)

- Modificación de las condiciones naturales de flujo interno de agua al colocar rellenos o hacer zanjas o excavaciones.
- Sobrecarga de estratos débiles por rellenos, a veces de desperdicios.
- Sobrecarga de terrenos con planos de estratificación desfavorables por relleno.
- Remoción, por corte, de algún estrato delgado de material permeable que funcionará como un manto natural drenante de estratos de arcilla suave.
- Exposición al aire y al agua, por corte, de arcillas duras fisuradas.
- Remoción de capas superficiales de suelo por corte, lo que puede causar el deslizamiento de capas del mismo estrato ladera arriba, sobre mantos subyacentes de suelo más duro o roca.

- Incremento de cargas hidrostáticas o niveles piezómetros bajo la superficie de un corte al cubrir la cama del mismo con una capa impermeable.

2.6. Medidas de protección superficial

- Estas medidas están encaminadas a:
- Eliminar el problema de caídas de rocas.
- Aumentar la seguridad del talud frente a roturas superficiales.
- Evitar o reducir la erosión y la meteorización en el frente del talud.
- Evitar la entrada de agua de escorrentía.
- Las actuaciones más frecuentes consisten en:
- Instalación de mallas metálicas.
- Gunitado de taludes (Hormigón proyectado a presión).
- Construcción de muros de revestimiento a pie del talud.
- Implantación de materiales geotextiles.
- Impermeabilización.
- Siembra de especies que contribuyen a reforzar el terreno superficial en taludes excavados en suelos.

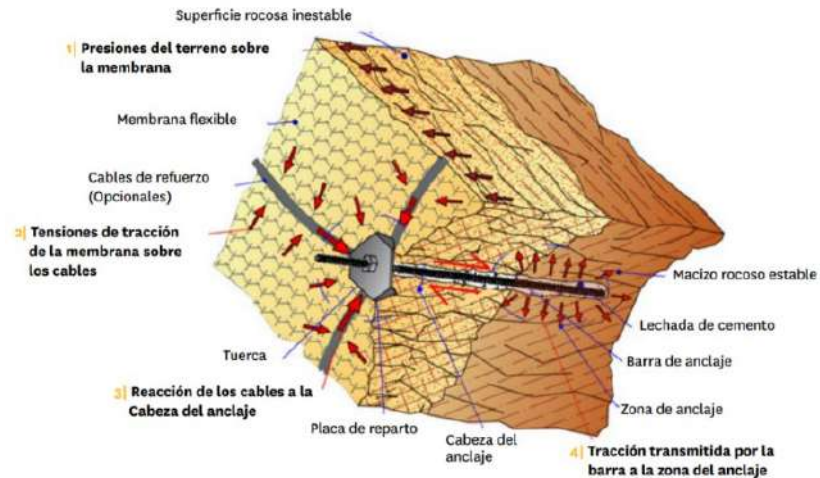
2.6.1. Instalación de mallas metálicas

La protección con mallas de acero de alta resistencia es un tratamiento superficial resistente, el procedimiento consiste en cubrir el talud con una malla, debidamente fijada al terreno. La malla no permite que los pequeños derrumbes o caídos, invadan la superficie de rodamiento de la vía terrestre. Los derrumbes o caídos son conducidos por detrás de la malla para que no puedan llegar a caer al trazado de la vía. (Ugalte Madrigal, 2015, pág. 6)

Por su naturaleza, permite un rápido drenaje del agua que satura el terreno y ayuda a la reforestación más fácilmente. Es un hecho que el aspecto de los taludes debe ser lo más natural e integrado posible con el medio circundante. De esta forma las mallas de acero

de alta resistencia establecen un efectivo y económico sistema de protección del suelo en taludes contra la erosión. (Ugalte Madrigal, 2015, pág. 6)

Figura 2.8. Estabilización usando anclajes en la malla



Fuente: Folleto, Desnivel Agranaltura S.A. pág. 6

Es necesario proteger los taludes de carretera con malla metálica de triple torsión porque se tratan de mallas de alta resistencia y ofrecen seguridad al usuario para evitar el desprendimiento de material suelto en el talud y de una gran cantidad de derrumbes, que además son un peligro continuo para los vehículos y evitando así que se obstruya las vías de comunicación ya que es uno de los problemas más graves que presentan las carreteras. (Ugalte Madrigal, 2015, pág. 6)

Figura 2.9. Colocación de malla



Fuente: Folleto, Desnivel Agranaltura S.A.

2.6.2. Gunitado de taludes (Hormigón proyectado a presión)

La membrana rígida consiste en la proyección de hormigón/mortero por vía seca o húmeda, con una mezcla homogénea de alto contenido en cemento, áridos de tamaño fino, agua, adictivos, revistiendo la superficie con armadura junto con el sistema de anclaje que se defina para cada proyecto, para conseguir la estabilización de la superficie. La superficie a su vez se drena para evitar la acumulación de agua y el aumento de presiones intersticiales, ya que estas membranas no son permeables. (Talufix, 2022, pág. 21)

La mezcla por vía húmeda, que es transportada hidráulicamente por mangueras o tubos de acero hasta la zona de recubrimiento donde se proyectaba por aire comprimido a través de una boquilla, formando capas que se adaptan a la superficie donde aumenta resistencia en poco tiempo. (Talufix, 2022, pág. 21)

Hormigón reforzado proyectado, con función estructural, cuando contiene fibras o elementos constructivos de refuerzo como mallas electrosoldadas o mallas de acero, se utiliza como sostenimiento primario. (Talufix, 2022, pág. 21)

Figura 2.10. Técnica de hormigón proyectado



Fuente: Folleto, Tecyrsa

2.6.2.1. Tipos de hormigón proyectado

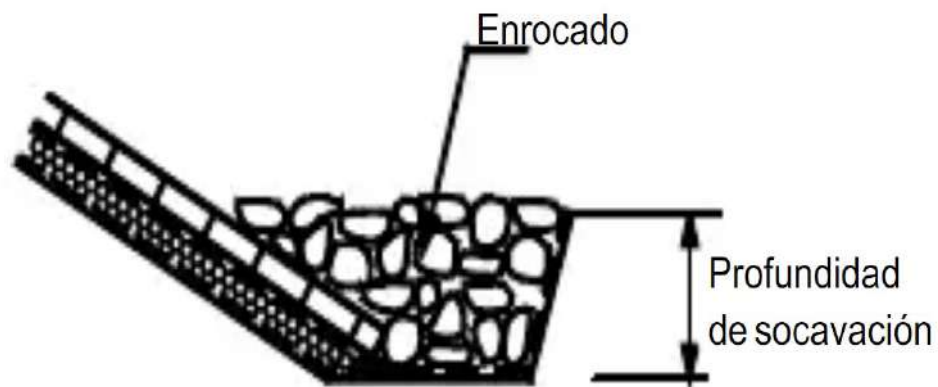
Dependiendo de la sollicitud de carga se ha de diseñar la mezcla, aumentando el refuerzo de acero y/o fibra, la proporción de cemento y el espesor de la capa a medida que la sollicitud de carga es mayor. (Talufix, 2022, pág. 21)

Cada proyecto tiene que estar calculado teniendo en cuenta el patrón de anclajes y la carga a soportar entre anclajes siendo la membrana de hormigón proyectado capaz de transmitir la carga de trabajo a los anclajes. (Talufix, 2022, pág. 21)

2.6.3. Construcción de muros de revestimiento a pie del talud

Se emplean como elementos resistentes en taludes; así la construcción implica excavar en el pie del talud lo cual puede desestabilizar el talud hasta que el muro esté instalado. Los muros se pueden clasificar en tres grandes grupos: Muros de sostenimiento los cuales se construyen separados del terreno y luego se rellenan; muros de contención que van excavados y se construyen para contener un terreno inestable, y muro de revestimiento el cual protege el terreno de la erosión y meteorización, además de proporcionar un peso estabilizador. (Ugalte Madrigal, 2015, pág. 8)

Figura 2.11. Detalle de protección del pie de un revestimiento de bloques de concreto



Fuente: Carlos Párraga, Revestimientos y muros pág. 406

2.6.4. Implantaciones de materiales geotextiles

2.6.4.1. Geotextiles para muros de contención y taludes

La utilización de geotextiles es más que recomendable ya que los beneficios que aportan son bastante numerosos. (Tex Delta, 2022).

Para la construcción de estos elementos podemos optar por tres geosintéticos diferentes: los geotextiles, las geomallas y las fibras de refuerzo. (Tex Delta, 2022)

Figura 2.12. Geotextil taludes



Fuente: Folleto, Construmática pág. 5

2.6.4.1.1. Los geotextiles

colocados bajo la capa superior, evitarán la pérdida de finos y áridos por agua de lluvia o subterránea. El geotextil está estabilizado frente a los rayos UV, aumentando sus características de resistencia y durabilidad frente a los daños provocados por las condiciones climáticas adversas. El geotextil tejido presenta un buen comportamiento frente a la degradación química en suelos ácidos y alcalinos, así como en suelos con soluciones salinas. (Tex Delta, 2022)

Ventajas de los geotextiles para muros de contención y taludes:

- Alta resistencia del material contra los daños durante la instalación

- Mejora las propiedades mecánicas del suelo gracias a su resistencia a la tracción y a la perforación.

Soluciones:

Refuerzo y estabilización de suelos en la construcción de carreteras y autovías.

- Refuerzo en la construcción de caminos temporales.
- Refuerzo para el aumento de la estabilidad de terraplenes, taludes, muros verdes...
- Sistemas de drenaje y conducción de aguas.

Funciones:

- Separación de distintas capas de materiales permitiendo la filtración de agua entre ellas.
- Aumenta la resistencia y la estabilidad de suelos en obras.
- Gracias a su menor apertura de poro permite crear una capa de filtración evitando el paso de finos entre capas, evitando la erosión y degradación del suelo.

2.6.4.1.2. Las geomallas

Son otro de los materiales que podemos utilizar para la construcción de taludes y muros de contención. Sus ventajas son: (Tex Delta, 2022)

- Fácil instalación incluso en condiciones climáticas desfavorables.
- Reducción del volumen en los movimientos de tierra.
- Mantiene el aspecto natural en laderas.
- Reduce significativamente la aparición de grietas en la superficie de los suelos reforzados.
- Alta resistencia del material contra los daños durante la instalación.
- Alta resistencia a la tracción.
- Reduce significativamente el movimiento del suelo en la zona de instalación.
- Mayor seguridad y estabilidad de taludes permitiendo filtración de agua y separación de capas de terreno.

2.6.4.1.3. Las fibras de refuerzo

Son utilizadas para constituir la mezcla de hormigón, cemento o concreto que se proyecta sobre taludes y laderas para evitar la erosión y el desprendimiento, aumentando su estabilidad y durabilidad. (Tex Delta, 2022)

2.6.5. Impermeabilización

2.6.5.1. Estabilizaciones y protecciones superficiales de taludes

2.6.5.1.1. Protección de erosión

Todos los taludes y laderas naturales están sujetos a fuerzas de erosión por estar expuestas a la intemperie. Si el talud fue creado recientemente como parte de una nueva obra o una nueva configuración geométrica, o si está en su estado natural, alguna medida de protección contra la erosión será necesaria. (Maccaferri, 2022)

Figura 2.13. Protección de los taludes (Impermeabilización)



Fuente: Folleto, Geotekne pág. 2

Posibles Soluciones

Protección contra la erosión que se adaptan a los taludes y la severidad de las fuerzas erosivas. La mayoría de estos productos también fueron diseñados para facilitar el restablecimiento de la vegetación en los taludes.

La naturaleza impredecible en el crecimiento de vegetación. Confiar en el crecimiento

de la vegetación es poco fiable, ya que es extremadamente difícil obtener cobertura vegetal 100 %, quedando áreas expuestas susceptibles a la erosión. Por otra parte, la vegetación puede morir o secarse, reduciendo la capacidad de control de la erosión.

Protegiendo e incrementando la resistencia del suelo. La amplia gama de mantas superficiales de protección MacMat® y BioMac® actúan contra la erosión, aumentando la resistencia del suelo a la erosión y dando protección inmediata a las zonas expuestas contra los efectos directos del viento y el impacto de la lluvia; protegiendo el suelo sembrado de ser lavado antes de que se establezca la vegetación.

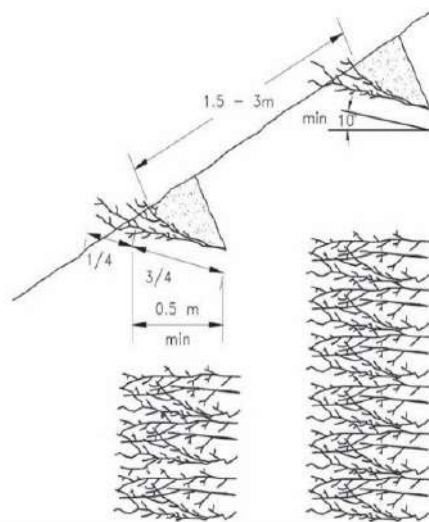
Productos que promueven una vegetación sustentable. Cuando se necesita un talud con vegetación, la simple colocación de suelo vegetal en un talud estéril no suele ser suficiente, las capas de suelo son arrastradas a la base del talud. El BioMac®, manta biodegradable y la geomanta sintética MacMat® actúan contra la erosión proporcionando métodos económicos de retención de suelo y humedad en el talud, lo que permite el desarrollo de la vegetación para la protección contra la erosión a largo plazo. (Maccaferri, 2022)

2.6.6. Siembra de especies que contribuyen a reforzar el terreno superficial en taludes excavados en suelos

2.6.6.1. Fajinas vivas

Las fajinas vivas están construidas a partir de especies leñosas: sauces, taráís, alisos o chopos, formando fardos con una estructura cilíndrica. La disposición de las estacas será orientada según las curvas de nivel, dotándolas de una ligera pendiente hacia los laterales del talud para drenar el exceso de humedad. Las fajinas se colocarán al tresbolillo con el fin de disminuir la longitud de la ladera, minimizando los procesos erosivos. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio, 2012, pág. 111)

Figura 2.14. Fajinas Vivas



Fuente: Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales (1998) pág. 299

El material vivo de la fajina enraíza y pasa a formar parte de la cobertura estabilizadora. Las fajinas vivas proporcionan un incremento inmediato de la estabilidad de la superficie y pueden aumentar la estabilidad del suelo hasta una profundidad de 0,75-1 m a medida que las raíces se van desarrollando. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio, 2012, pág. 111)

2.6.6.2. Fajinas mixtas

Cumplen las mismas funciones que las vivas, solo que, en lugar de ramas, se utilizan en su construcción rollizos de madera y/o redondos de acero. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio, 2012, pág. 112)

Están formadas por estacas de pino de 1 m de longitud y 10 cm de diámetro, hincadas en el suelo 50 cm, a las que se clavan otros cinco rollizos de 2 m de longitud y el mismo diámetro, hasta formar una pantalla de 50 cm de altura. Se rellenan de tierra vegetal y se procede a la plantación de especies leñosas de fácil arraigo. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio, 2012, pág. 112)

El proceso constructivo es muy similar a las fajinas vivas.

Figura 2.15. Vista lateral de fajina mixta revegetada



Fuente: Caminos Naturales pág. 112

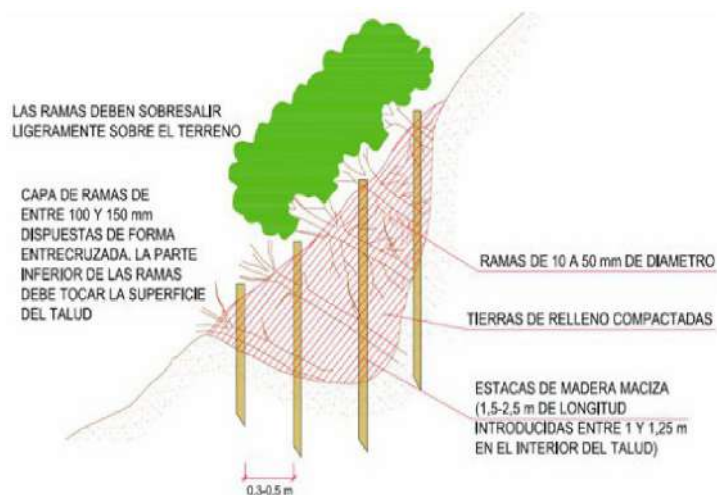
Desde la base del talud hacia su parte alta se van instalando sucesivas filas de fajinas hasta completar el tratamiento. Siempre que sea posible es conveniente instalar una o dos filas de fajinas sobre la parte superior del talud. La distancia entre las sucesivas filas de fajinas varía en función de la pendiente y la longitud del talud. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio, 2012, pág. 112)

2.6.6.3. Paquetes de matorral

Esta técnica de corrección de cárcavas en taludes, consiste en rellenar la cárcava con capas alternas de ramas de matorral enraizante y tierras de relleno compactadas y tierra vegetal, fijando el conjunto con una serie de rollizos de madera clavados en el fondo de la depresión.

Esta técnica es efectiva para el refuerzo y la estabilidad frente a fenómenos erosivos. Las ramas actúan como tirantes que refuerzan el suelo una vez instaladas. Cuando comienzan a crecer y desarrollan follaje, frenan la escorrentía y disipan su energía erosiva. Las raíces enlazan el material de relleno y lo anclan al sustrato de suelo natural, formando una masa unificada. La vegetación desarrollada actúa como barrera, reduciendo la erosión y el socavamiento de los materiales. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio, 2012, pág. 113)

Figura 2.16. Paquete de matorral



Fuente: Adaptado del manual de estabilización y revegetación de taludes, pág. 113

Se utilizarán ramas de 10 a 50 mm de diámetro y longitud suficiente para llegar a contactar con la superficie del talud en el fondo de la depresión que se está reparando y sobresalir ligeramente por la parte externa de ésta. Los rollizos de madera tendrán entre 1,5 y 2,5 m de longitud y de 75 a 100 mm de diámetro. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio, 2012, pág. 113)

La instalación comienza por el punto más bajo de la zona a reparar, hincando las estacas de madera verticalmente a una profundidad entre 1 y 1,25 m, distanciadas entre sí de 15 a 30 cm. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio, 2012, pág. 113)

Se sitúa una capa de ramas entre 10 y 15 cm de espesor en el fondo del deslizamiento, entre las estacas verticales, perpendicularmente a la cara del talud. Las ramas deben situarse entrelazadamente con los extremos de las yemas de crecimiento orientadas hacia la superficie del talud. Las siguientes capas de ramas se colocan con el extremo final más bajo que el extremo que tiene las yemas de crecimiento. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio, 2012, pág. 113)

Cada capa de ramas se cubre con una capa de tierra vegetal compactada para asegurar un íntimo contacto con el suelo. Una vez concluida la instalación, el perfil final del relleno de ramas y tierra debe enrasar con la superficie del talud, sobresaliendo ligeramente las

ramas sobre la capa de relleno. La tierra vegetal de relleno debe de humedecerse para evitar que las ramas se dessequen. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio, 2012, pág. 113)

2.7. Esfuerzo

Se denomina esfuerzo a la fuerza por unidad de área, la cual se denota con la letra griega sigma (σ) y es un parámetro que permite comparar la resistencia de dos materiales, ya que establece una base común de referencia. (Rodríguez)

$$\sigma = P/A$$

Donde:

P= Fuerza axial (Kg)

A= Área de la sección (cm²)

2.7.1. Tracción

Se denomina tracción al esfuerzo interno a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo. (Rodríguez)



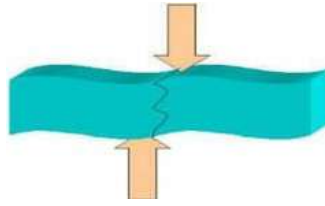
2.7.2. Compresión

Un cuerpo se encuentra sometido a compresión si las fuerzas aplicadas tienden a aplastarlo o comprimirlo. (Rodríguez)



2.7.3. Corte

Es el esfuerzo al que está sometida a una pieza cuando las fuerzas aplicadas tienden a cortarla o desgarrarla. El ejemplo más claro de cortadura lo representa la acción de cortar con unas tijeras. (Rodríguez)



2.8. Deformación

Es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o la ocurrencia de dilatación térmica.

Una barra sometida a una fuerza axial de tracción aumentara su longitud inicial; se puede observar que, bajo la misma carga, pero con una longitud mayor este aumento o alargamiento se incrementara también.

Por ello definir la deformación (ϵ) como el cociente entre el alargamiento δ y la longitud inicial L , indica que sobre la barra la deformación es la misma porque si aumenta L también aumentaría δ . (Rodríguez)

Matemáticamente la deformación sería:

$$\epsilon = \delta/L$$

Donde:

ϵ = Deformación

δ = Coeficiente de alargamiento (mm)

L = Longitud (mm)

2.8.1. Tipos de deformación

Los materiales pueden experimentar 3 tipos de deformaciones:

- **Elástica**

el material recupera su forma y su volumen original cuando cesa el esfuerzo. Es por tanto una deformación transitoria y ocurre por ejemplo durante la propagación de las ondas sísmicas.

- **Plástica**

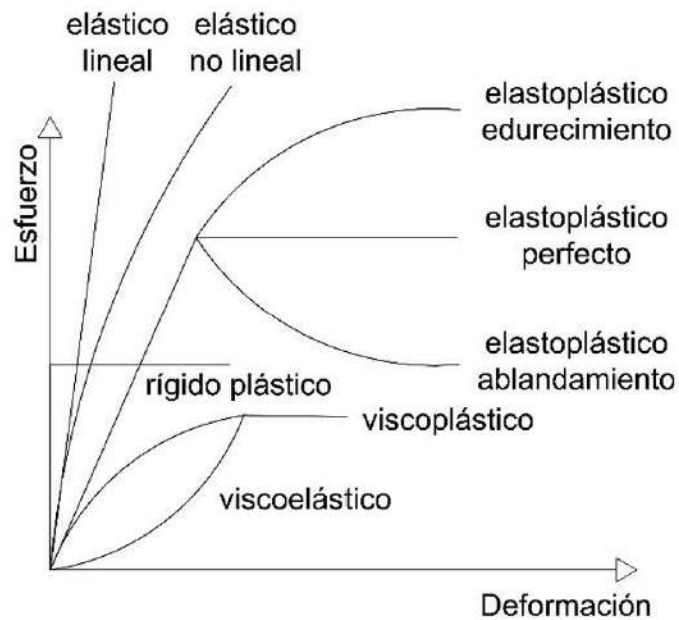
En la cual la deformación permanece después de haber cesado el esfuerzo.

- **Por rotura**

En la que el esfuerzo hace perder la cohesión entre las partículas del material y este se fractura.

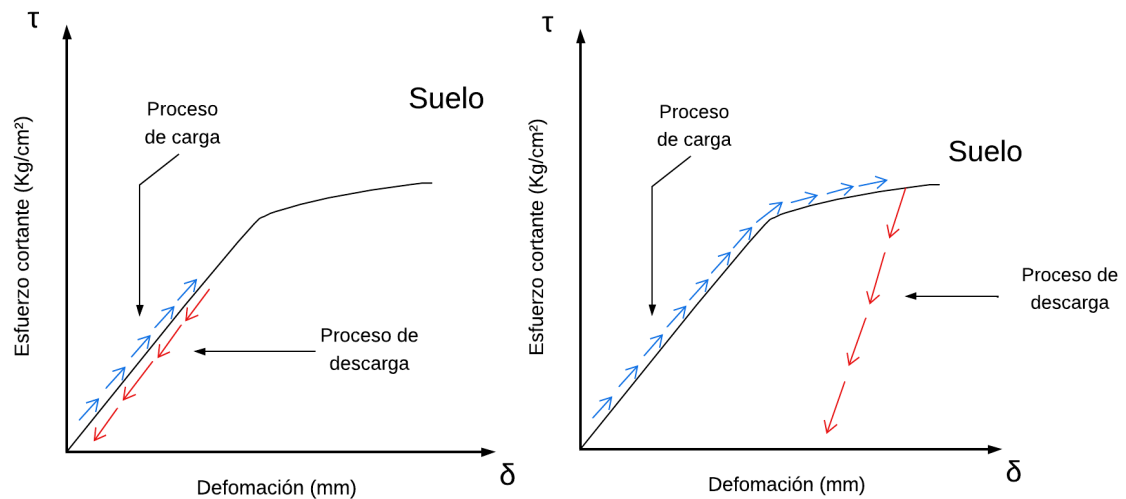
2.9. Diagrama esfuerzo-deformación

Figura 2.17. Esfuerzo cortante " τ " vs Esfuerzo normal " σ "



Fuente: Revista investigativo y desarrollo I+D

Figura 2.18. Relación esfuerzo – deformación



Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

El proceso de carga son los esfuerzos ya sea a compresión, que van actuando a lo largo de la curva hasta encontrar el punto.

La curva esfuerzo deformación de cierto material, es el proceso de carga que debe realizarse bajo una velocidad controlada, debido a que el comportamiento esfuerzo deformación se vería afectado presentando mayor rigidez si se aplica mayor carga con mayor velocidad.

La curva de descarga se desarrolla a partir de aplicar una carga incremental con una velocidad controlada. El proceso de descarga debe seguir la misma secuencia, retirar la carga paulatinamente hasta retirar toda la carga con una velocidad controlada.

La velocidad dependerá del tipo de ensayo y del material empleado.

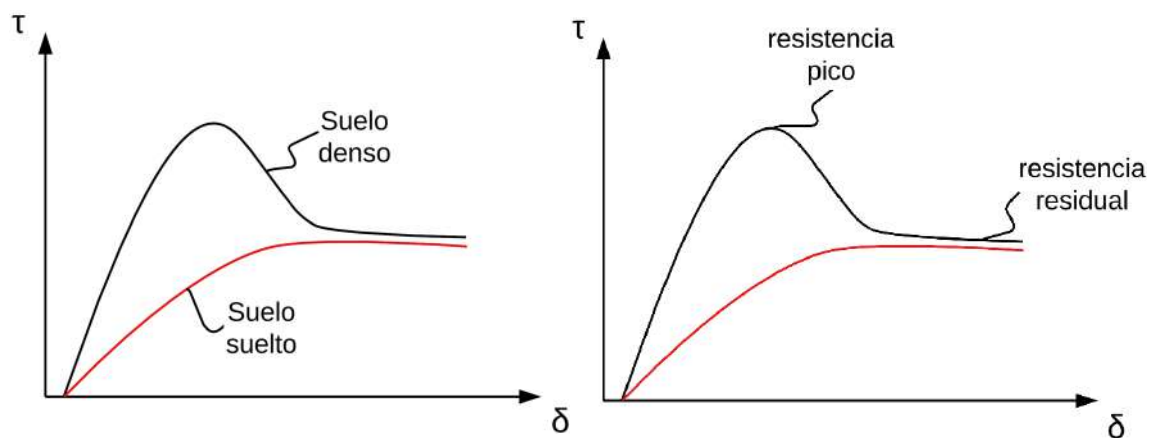
Cuando el proceso de carga y descarga llega al origen estamos hablando de un material elástico. Durante el proceso de carga se le aplica al material una energía para deformarse, esta energía se aplica en forma de esfuerzo aplicado. El material es capaz de retener toda esta energía y luego utilizarla para retornar a su forma original. Este proceso se presenta en un material y caso ideal cosa que no resulta, porque la energía aplicada en el material se disipa es decir se transforma en otros tipos de energías, produciendo pérdidas y evitando retornar a su forma inicial, en este caso estaríamos hablando de un material plástico.

Podemos concluir que el comportamiento en función al esfuerzo deformación del suelo, es elastoplástica.

2.10. Teoría del estado crítico o esfuerzo residual

Estado crítico o estado de falla último, es el nombre dado al estado de esfuerzos en el cual el suelo ha alcanzado un estado estable. (Chamorro Zurita & Fernandez Lavin, 2022, pág. 120)

Figura 2.19. Esfuerzo cortante " τ " vs Esfuerzo normal " σ "



Fuente: Revista investigativo y desarrollo I+D

2.11. Suelos residuales

Se define como el derivado por la meteorización y descomposición de la roca in situ. (Rodriguez)

2.12. Ensayo corte directo

Debemos recordar que se efectúa un ensayo por cada uno de los tres especímenes obtenidas a partir de la muestra.

La elección de los valores P_v para cada espécimen deben ser coherentes con las condiciones de campo.

Recordar que la recta que define el criterio de falla es de Mohr-Coulomb.

Tabla 2.1. Cargas consideradas en el ensayo corte directo

	σ_n (Kg/ Cm ²)	σ_n (Kg/ Cm ²)	σ_n (Kg/ Cm ²)
Espécimen 1	0,5	1	2
Espécimen 2	1	2	4
Espécimen 3	2	4	6

Fuente: Elaboración propia

$$\sigma = P_v * A$$

Donde:

σ = Esfuerzo normal (kg/cm²)

P_v = Carga vertical (kg)

A = Área de la probeta (cm²)

$$\tau = FV_{max} * A$$

Donde:

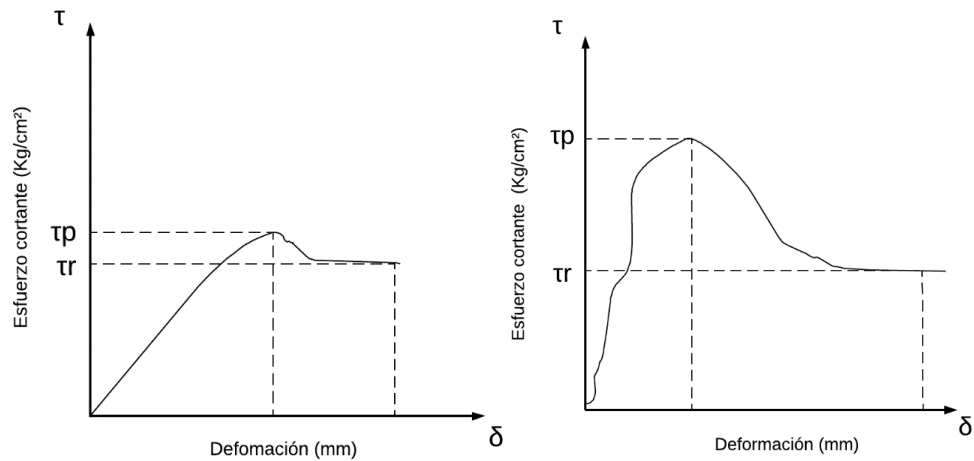
τ = Esfuerzo de corte (kg/cm²)

FV_{max} = Fuerza cortante máximo (kg)

A = Área de la probeta (cm²)

De acuerdo a los tres especímenes obtenidos de una muestra y considerando las cargas verticales de acuerdo a la tabla 2.1, procedemos a obtener tres curvas.

Figura 2.20. Esfuerzo cortante " τ " vs Deformación " δ " de 1 y 2 Kg



Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que el ensayo corte directo tiene dos etapas; la primera debido a la aplicación de una carga normal y la otra por una fuerza cortante

La curva esfuerzo deformacion esta en funcion a la nube de puntos formadas por las presiones normales tanto verticales como horizontales, lecturadas por el deformimetro ubicada en la parte superior de la caja que contiene la muestra de suelo y el otro en los anillos horizontales que aplican presión en la caja de la muestra hasta encontrar el esfuerzo cortante de falla máximo, en el ensayo de corte directo.

La deformación horizontal, tambien llamado como tangencial o deformación unitaria. Esta en función a la lecturación horizontal y la precisión externa horizontal.

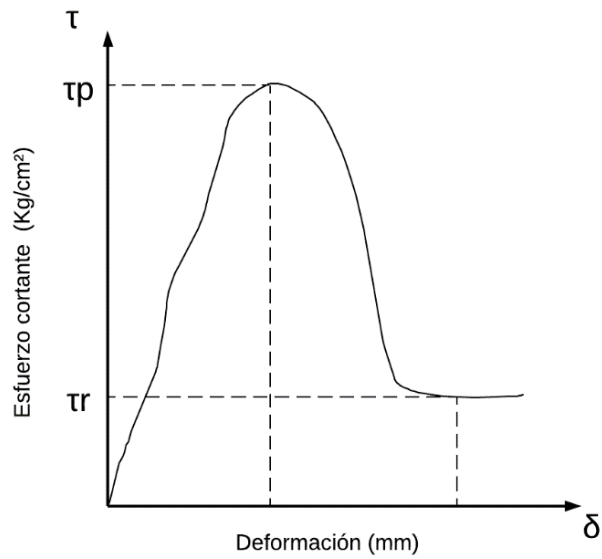
Donde:

τ_p = Esfuerzo cortante pico

τ_r = Esfuerzo cortante residual

La diferencia de altura de la campana entre la muestra de 1 Kg y de 2 kg, es notorio, debido a que la muestra de 2 kg el suelo se encuentra más confinada, está más comprimido. En cuanto más confinada este el suelo podrá desarrollar mayor resistencia pico.

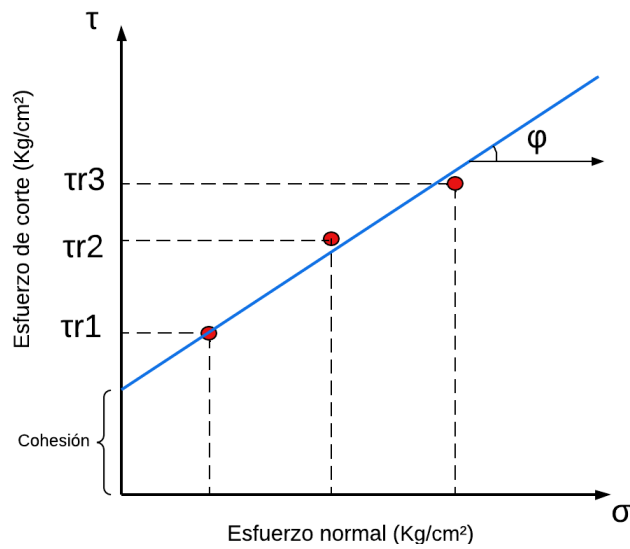
Figura 2.21. Esfuerzo cortante " τ " vs Deformación " δ " de 4 Kg



Fuente: Elaboración propia

Con los valores de los esfuerzos cortantes picos o máximos obtenemos la siguiente figura 2.22.

Figura 2.22. Esfuerzo cortante " τ " vs Esfuerzo normal " σ "



Fuente: Elaboración propia

La envolvente de falla, marcación de los puntos rojos nos indican los puntos combinados con el esfuerzo cortante y esfuerzo normal, que llevan al suelo a la falla.

De acuerdo a criterio de Mohr-Coulomb es representada por la línea de recta de acuerdo a la figura 2.22. Los esfuerzos de corte están en función a los valores de los esfuerzos cortantes máximos con relación a las fuerzas cortantes y el área de la probeta y los esfuerzos normales, están en función a las cargas normales o verticales y el área de la probeta.

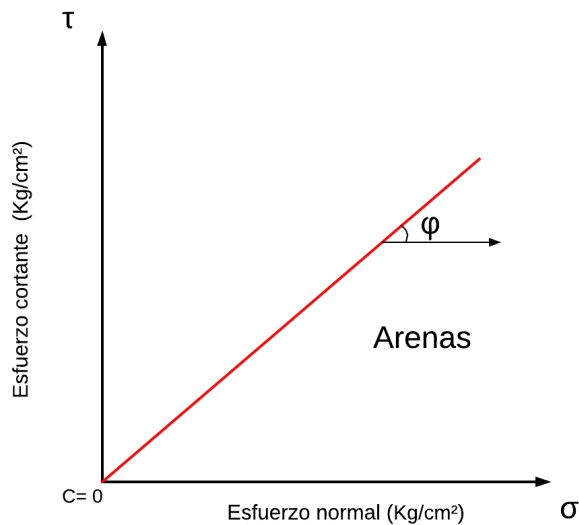
La línea recta de regresión interceptando aproximadamente a los puntos de esfuerzos cortantes máximos o picos. Se dice aproximadamente porque es difícil que la línea coincida con los puntos, debido a que ellos están en función a una envolvente de falla circular según el criterio de Mohr-Coulomb.

La intercepción de la línea de regresión con el eje del esfuerzo cortante, nos indica el valor de la cohesión efectiva.

La formación de una línea paralela del eje de deformación con la línea recta de regresión, forman el ángulo de fricción efectiva.

2.13. Gráficas que se esperan en cierto tipo de suelos

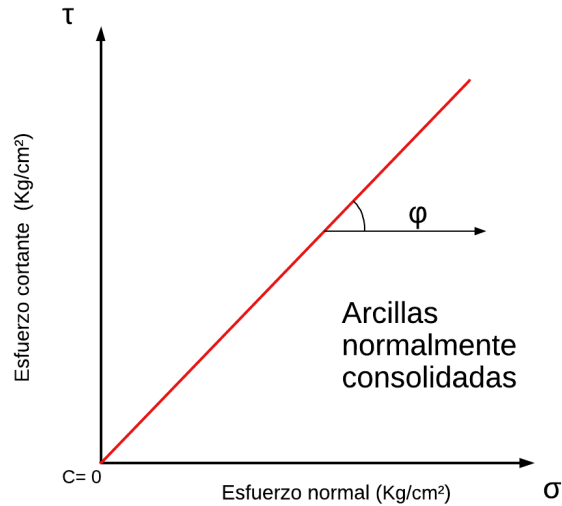
Figura 2.23. Esfuerzo cortante " τ " vs Esfuerzo normal " σ "



Fuente: Elaboración propia

El ensayo de corte directo en arenas se espera una cohesión $c=0$. Las arenas poseen un ángulo de fricción de 27° - 28° como mínimo en arenas sueltas y en arenas densas de 35° - 46° .

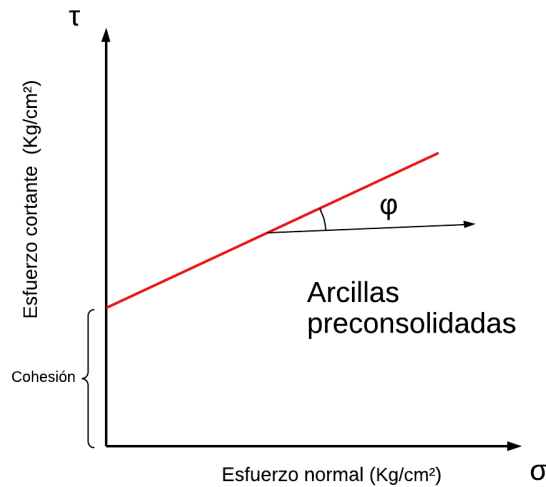
Figura 2.24. Esfuerzo cortante " τ " vs Esfuerzo normal " σ "



Fuente: Elaboración propia

Se considera que una arcilla es sinónimo de cohesión, pero no siempre es el caso. Si se presenta una arcilla normalmente consolidada representara a la gráfica con cohesión $c=0$ y ángulos de fricción de 18° - 28° .

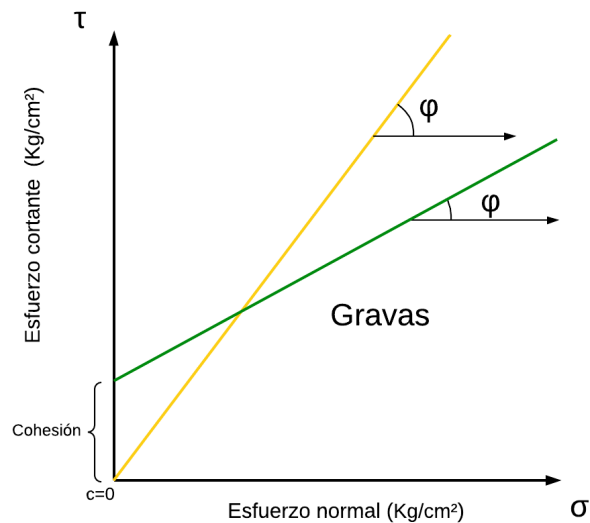
Figura 2.25. Esfuerzo cortante " τ " vs Esfuerzo normal " σ "



Fuente: Elaboración propia

Obtenemos valores de cohesión es decir $C > 0$ y ángulo de fricción de $16-15^\circ$, mientras más preconsolidadas está la arcilla la cohesión será mayor y el ángulo de fricción menor.

Figura 2.26. Esfuerzo cortante " τ " vs Esfuerzo normal " σ "



Fuente: Elaboración propia

En el caso de gravas, la curva de color amarillo nos indica una cohesión $c=0$, como también la línea verde nos presenta cohesión $c > 0$ debido a los materiales finos adheridos en las gravas. También llamado con intercepto cohesivo.

2.14. Estabilidad de taludes

La estabilidad de taludes puede ser abordado desde distintos aspectos. Cuando se habla de estabilidad, se trata de encontrar la altura crítica del talud o la carga de colapso aplicada sobre una porción del talud, para una geometría y características de suelo dados. Evaluar la estabilidad de un talud implica un estudio en el cual se debe, entre otros eventos: caracterizar la resistencia del suelo, establecer el perfil del talud, así como las condiciones de filtración y agua subterránea, seleccionar una superficie de deslizamiento o falla y calcular su factor de seguridad, finalmente, a partir de este factor de seguridad (el cual se elige en base al destino del talud) se deberá determinar la superficie de falla crítica. Más allá del problema de la modelación material del suelo, está presente el problema del estudio de los criterios de evaluación de sistemas estructurales. (Suárez Díaz, 2012, pág. 17)

En este sentido es necesario, una vez calibrados y verificado la capacidad predictiva de los modelos computacionales desarrollados, Llevar a cabo el análisis computarizado de sistemas estructurales que involucren complejidades relevantes, frente a acciones estáticas y dinámicas a fin de contribuir al avance del conocimiento en lo referente a la formulación de criterios de diseño más eficientes y realistas. Dentro de este marco, se estudió el comportamiento de suelos cohesivo-friccionales con distintos niveles de humedad y condiciones de borde. (Suárez Díaz, 2012, pág. 18)

Para el estudio de la estabilidad de un talud se hace uso de un factor de seguridad (FS.), el cual se obtiene de un análisis matemático de estabilidad. Este debe tener en cuenta factores como la geometría del talud, parámetros geológicos, cargas sísmicas, flujo de agua, propiedades gravimétricas de los suelos entre otras. (Suárez Díaz, 2012, pág. 18)

Aunque es una herramienta muy veraz para el Ingeniero no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar, tales como la acción antropogénica, para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones y debilidades en los modelos que no permiten la obtención de resultados satisfactorios. (Suárez Díaz, 2012, pág. 18)

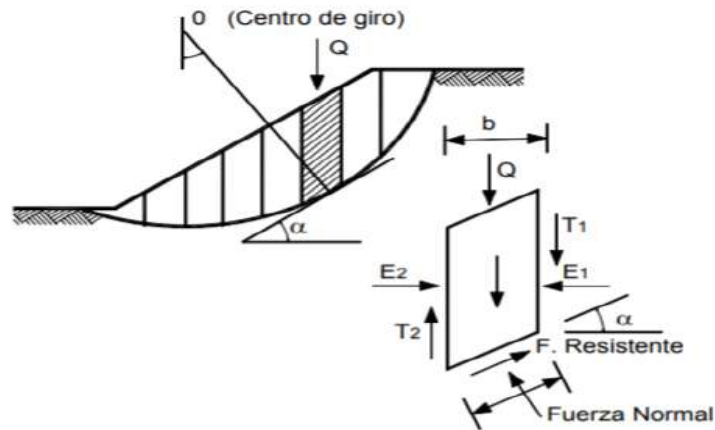
2.15. Métodos de análisis

A continuación, se presentan algunos métodos de análisis universalmente conocidos para el cálculo del factor de seguridad.

2.15.1 Método de Fallenius

El método de Fellenius, es conocido también como método Ordinario o dovelas, método sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de los momentos con respecto al centro del círculo (producidos por estas fuerzas) se obtiene el Factor de Seguridad. (Suarez Díaz, pág. 153)

Figura 2.27. Equilibrio límite con el método de Fallenius



Fuente: Deslizamientos análisis geotécnico Jaime Suarez pág. 154

Las fuerzas que actúan sobre una dovela son:

El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.

Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.

Las fuerzas de presión de tierra y cortante en las paredes entre dovelas, no son consideradas por Fellenius.

Al realizar la sumatoria de momentos con respecto al centro del círculo, se obtiene la siguiente expresión:

$$FS. = \frac{\sum[(C' * \Delta l) + (W * \cos \alpha - u \Delta l \cos 2 \alpha) \tan \phi']}{\sum W * \sin \alpha}$$

Dónde:

α = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

W = Peso total de cada tajada.

u = Presión de poros = $\gamma w h w$

Δl = Longitud del arco de círculo en la base de la tajada

C' , ϕ' = Parámetros de resistencia del suelo. La ecuación anterior se conoce como ecuación de Fellenius.

El método ordinario o de Fellenius, solamente satisface los equilibrios de momentos y no satisface el equilibrio de fuerzas. Para el caso de $\phi = 0$, el método ordinario da el mismo valor del factor de seguridad que el método del arco circular.

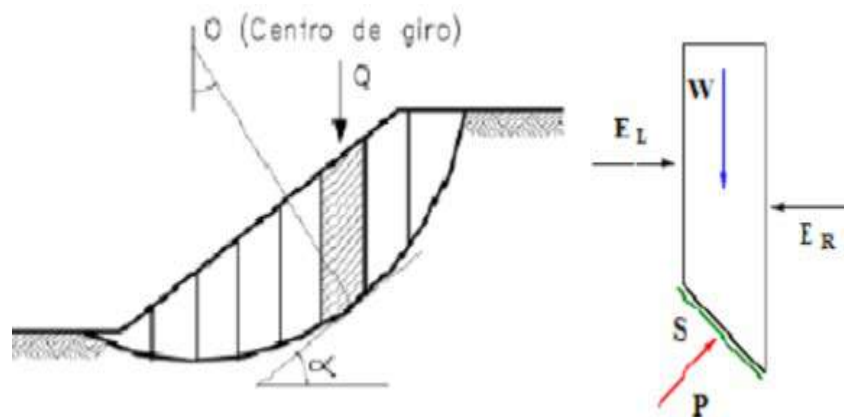
Los análisis del método de Fellenius son muy sencillos y se pueden realizar con métodos manuales o en el computador. Debe tenerse en cuenta que el método ordinario es menos preciso que otros procedimientos y la precisión disminuye a medida que la presión de poros se hace mayor. (Suarez Díaz, pág. 154)

2.15.2 Método de Bishop

Bishop (1955) presentó un método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas. Bishop asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales. (Suarez Díaz, pág. 155)

Es un método que supone una superficie de falla circular, en la cual la masa deslizante se divide en rebanadas verticales. En dichas dovelas se toman en cuenta las cargas externas y fuerzas normales, pero se ignora las tensiones tangenciales.

Figura 2.28. Esquema de fuerzas actuantes en las dovelas método Bishop



Fuente: Delgado, Mauricio Antonio Delgado Villagómez Quito (2018) pág. 42

La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón, se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo con la expresión:

$$FS.=\sum \frac{\{(C'b)+(W-ub)\text{Tan } \phi' /ma\}}{\sum W\text{Sen } \alpha}$$

Donde:

$$ma = \text{Cos } \alpha \left(1 + \frac{\{\text{Tan } \alpha * \text{Tan } \phi\}}{F.S}\right)$$

b = Ancho de la dovela

W = Peso de cada dovela

C' φ = Parámetros de resistencia del suelo

U = Presión de poros en la base de cada dovela = wγ * hw

A = Ángulo del radio de la vertical en cada dovela

Es un método confiable pues su valor varía con un 5% con los métodos más precisos, puede ser aplicado también en superficies de falla no circulares. (Villagómez, 2018, pág. 42)

El método simplificado de Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos en comparación con el método ordinario.

2.15.3. Método de las dovelas o rebanadas

Este evalúa un talud homogéneo usando superficies de falla circulares. La masa potencial de falla se divide en rebanadas y su factor de seguridad se computa asumiendo que no hay fuerzas entre tajadas, haciendo la ecuación lineal. (Palate Bombón, 2018, pág. 16)

$$FS. = \frac{(\sum C * L + \sum N * \text{tg } \theta)}{\sum W * \text{sen } \alpha}$$

Donde:

W = Peso

α = Inclinación base de la tajada

L = Longitud de la base de la rebanada

C = Cohesión

$N = W * \cos * \alpha$

2.15.4. Método de Morgenstern y Price

Este método considera esfuerzos normales y cortantes entre tajadas, satisfaciendo equilibrio de fuerzas y de momentos. La única diferencia es que el método de Morgenstern permite especificar diferentes tipos de fuerzas interactuantes. (Morataya Pérez, 2011, pág. 46)

2.15.5. Método de Janbu simplificado

El método simplificado de Janbu se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas de cortante.

La condición de equilibrio proporciona un factor de seguridad en el cual se aplica un factor de corrección f_0 para suplir la ausencia de fuerzas entre elementos de la dovela. La expresión matemática que relaciona el factor de seguridad entre fuerzas horizontales y fuerzas entre elementos es:

$$F_f = f_0 * F_0$$

Donde:

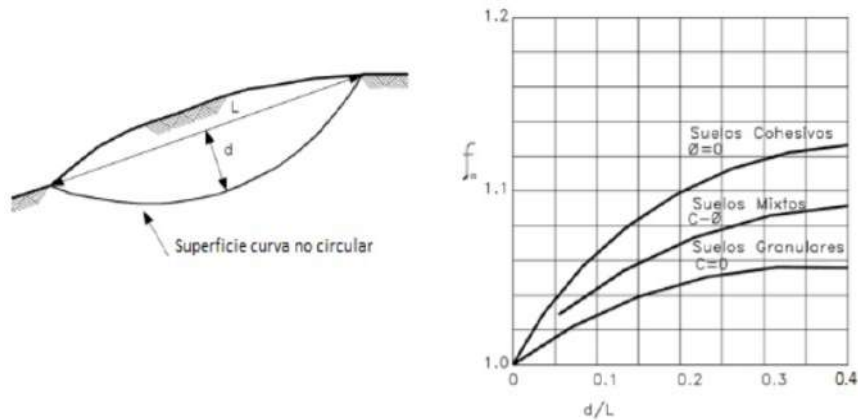
F_f = Equilibrio de fuerzas horizontales

f_0 = Factor de corrección

F_0 = Fuerzas entre elementos

Janbu considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección f_0 . El factor f_0 depende de la curvatura de la superficie de falla.

Tabla 2.2. Factor de corrección Fo en el método de Janbu



Fuente: Delgado, Mauricio Antonio Delgado Villagómez Quito pág. 43

El método de Janbu solamente satisface el equilibrio de esfuerzos y no satisface el equilibrio de momentos. De acuerdo con Janbu (ecuación modificada):

$$FS = \frac{f_0 \sum [(C' * b) + (W - ub) \tan \phi] * \left(\frac{1}{\cos \alpha * m_a} \right)}{\sum (W * \tan \alpha)}$$

Donde:

$$m_a = \cos \alpha \left(1 + \frac{\{ \tan \alpha * \tan \phi \}}{F.S} \right)$$

b = Ancho de la dovela

W = Peso de cada dovela

$C' \phi$, = Parámetros de resistencia del suelo

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $w\gamma * h_w$

α = Ángulo del radio de la vertical en cada dovela.

A continuación, se presenta un resumen de las tablas desarrolladas por Janbu (1968). Esta serie de tablas tiene en cuenta diferentes condiciones geotécnicas y factores de sobrecarga en la corona del talud, incluye sugerencia y grietas de tensión.

a) Para suelos $\varphi = 0$

Las tablas indicadas en el cuadro 5 pueden ser utilizadas para el análisis de estabilidad de taludes de suelos arcillosos sin fricción, de acuerdo a procedimiento desarrollado por Janbu (1968). El Factor de Seguridad se obtiene por la siguiente expresión:

$$FS. = N_o (c / \gamma H)$$

Donde:

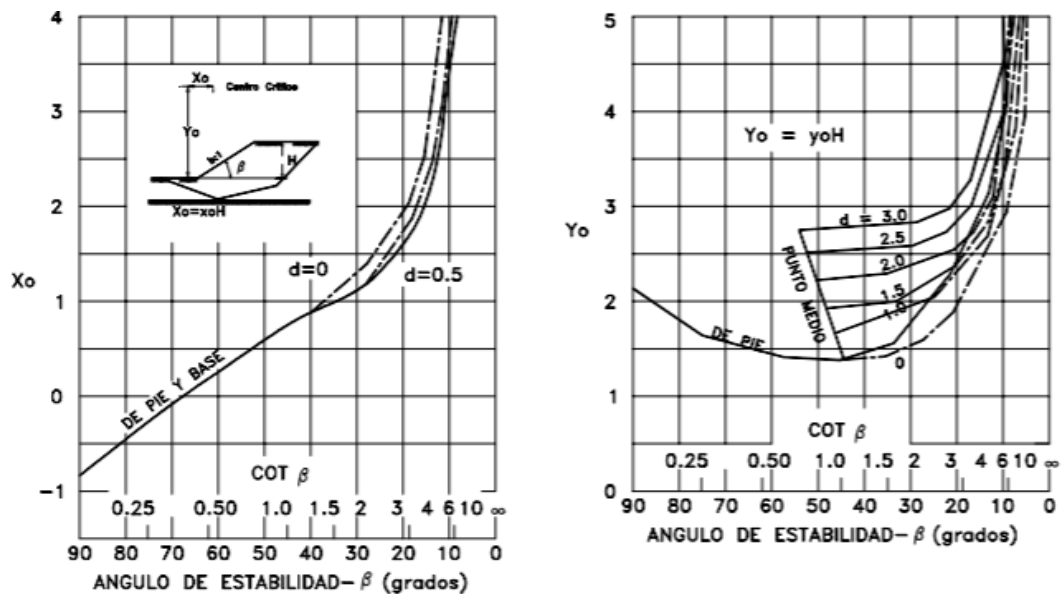
N_o = Número de estabilidad que se obtiene de la tabla

c = Cohesión

γ = Peso unitario del suelo

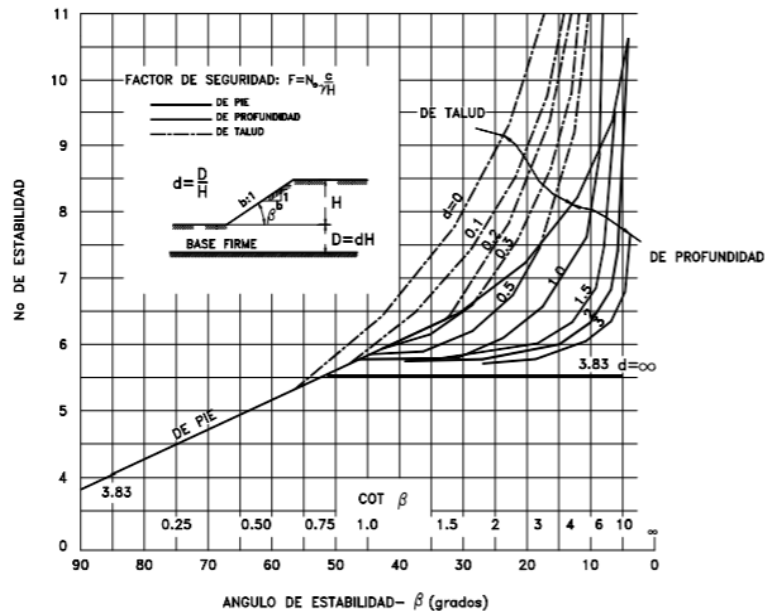
H = Altura del talud

Tabla 2.3. Tablas de estabilidad para suelos cohesivos ($\varphi = 0$)
de acuerdo a Janbu



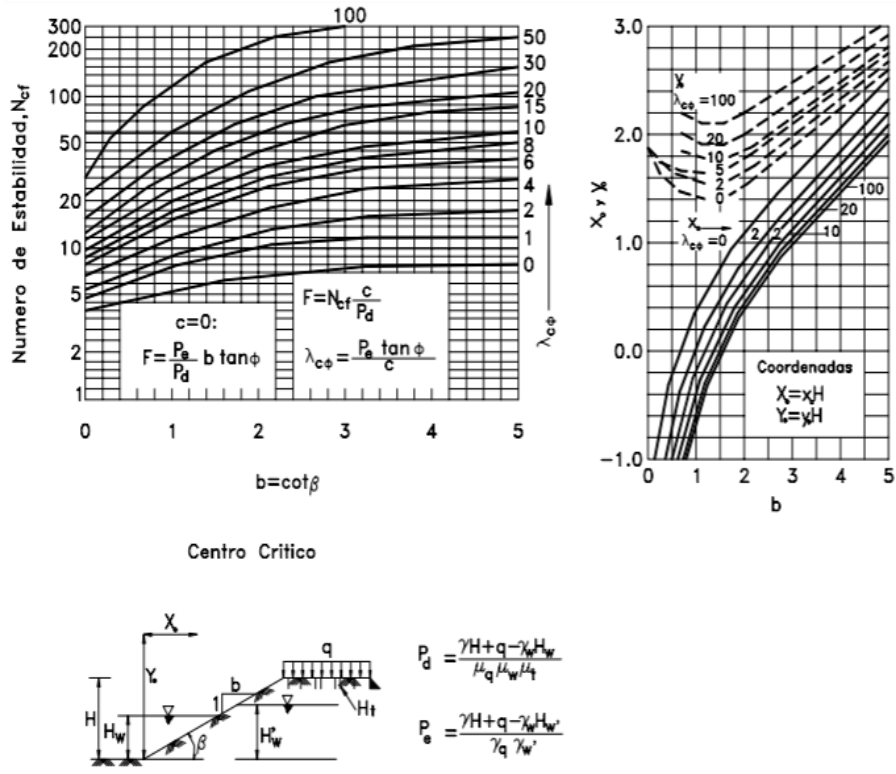
Fuente: Deslizamientos y estabilidad de taludes Jaime Suarez, pág. 125

Tabla 2.4. Tablas de estabilidad para suelos cohesivos ($\phi = 0$) de acuerdo a Janbu



Fuente: Deslizamientos y estabilidad de taludes Jaime Suarez, pág. 125

Tabla 2.5. De estabilidad para suelos no cohesivos $\phi > 0$ de acuerdo a Janbu (1968)



Fuente: Deslizamientos y estabilidad de taludes Jaime Suarez, pág. 126

b) Para suelos $\phi > 0$

En la mayoría de los casos para suelos $\phi > 0$ el círculo crítico pasa por el pie del talud y la tabla de estabilidad que se muestra en la figura 11, se basa en esta suposición. El factor de seguridad F es calculado por la expresión:

$$FS. = Ncf (c / Pb)$$

Donde:

Ncf y Pd = Son los obtenidos en la gráfica

c = Es la cohesión promedio.

Tabla 2.6. Métodos de análisis universales

Método	Año	Superficie de falla	Equilibrio	Características
Fallenius	1927	Circular	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy usado por su procedimiento simple. Resulta muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Arroja factores de seguridad bajos en círculos profundos.
Bishop	1954	Circular	De momentos	Asume que todas las fuerzas de corte entre dovelas son nulas. Reduce el número de incógnitas. La solución es indeterminada debido a que no se

				establece condiciones de equilibrio para una dovela. El cálculo se lleva a cabo buscando el equilibrio de momentos respecto al centro del arco circular.
Morgenstern y Price	1965	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método de Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria
Janbu	1968	Cualquier forma	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de corte entre dovelas. Este método utiliza un factor de corrección para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son relativamente bajos.
Spencer	1967	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Asume que las inclinaciones de las fuerzas laterales son iguales para cada rebanada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre rebanadas elementales tiene una inclinación constante pero desconocida.

Elementos finitos		Cualquier forma	Analiza esfuerzos y deformación	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos. Pero no se obtiene un factor de seguridad.
-------------------	--	-----------------	---------------------------------	--

Fuente: Bowles, J. Manual de laboratorio de suelos de Ingeniería Civil

2.16. Factor de seguridad

La estabilidad de los taludes se determina a través del factor de seguridad. Este factor expresa “la magnitud en que puede reducirse la Resistencia a cortante del suelo para que se produzca el deslizamiento a lo largo de la superficie de la falla más desfavorable”. El factor de seguridad depende de: (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987, pág. 209)

- La representatividad de los parámetros del material de la cimentación y del cuerpo del talud, obtenidos mediante investigación geotécnica, en función de los estados de carga que se necesiten estudiar al diseñar el talud.
- El método de análisis de estabilidad.
- La aproximación al asumir los valores de las presiones de poros y la forma de manipular éstas, al realizar el análisis de estabilidad.

Dado un talud con geometría establecida y propiedades de suelo definidas, se obtendrá un factor de seguridad mínimo ($F_{mín}$), que expresa la magnitud de la reducción que deben experimentar los parámetros de resistencia a cortante del suelo, según el criterio de Coulomb (c y $\tan(\phi)$), para alcanzar un estado de Equilibrio Límite. El factor de seguridad mínimo de todas las posibles superficies de falla debe cumplir la siguiente condición de diseño: (ORTIZ QUIZHPI & PORTILLA FLORES, 2014, pág. 20)

$$F_{mí} \geq F_{norm}$$

En el diseño geotécnico se utiliza un Factor de Seguridad global que considera o agrupa todas las incertidumbres asociadas en el proceso de diseño, sin distinguir si éste es

aplicado a la resistencia de los geomateriales o los efectos de las cargas. (NEC-SE-GC, 2014, pág. 30)

2.16.1. Factores de seguridad por corte mínimo

En los análisis de estabilidad se define el Factor de Seguridad por corte FS. corte, como la relación entre esfuerzo cortante último resistente o esfuerzo cortante a la falla y esfuerzo cortante actuante. (NEC-SE-GC, 2014, pág. 31)

$$FS.corte = \frac{\tau_f}{\tau_a}$$

Donde:

τ_f = Esfuerzo cortante a la falla.

τ_a = Esfuerzo cortante actuante

La resistencia al corte se define como el máximo esfuerzo cortante que el suelo puede resistir. La resistencia del suelo está controlada por el esfuerzo efectivo, aunque la falla ocurra en condiciones drenadas o no drenadas. El esfuerzo cortante a la falla se expresa por medio del modelo de falla de materiales según la ley de Mohr-Coulomb. (NEC-SE-GC, 2014, pág. 31)

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

Donde:

τ_f = Esfuerzo cortante a la falla.

c' = Cohesión efectiva.

ϕ' = Ángulo de fricción efectivo.

σ' = Esfuerzo normal efectivo.

El esfuerzo normal efectivo es:

$$\sigma - u$$

Donde:

σ = Esfuerzo normal total.

u = Presión de fluidos o presión de poro.

Por lo tanto, también se define el esfuerzo cortante actuante τ_A como esfuerzo cortante de trabajo o de diseño τ_D :

$$\tau_A = c' + \sigma' \tan \phi' / \text{FS.corte}$$

Donde:

FS.corte = Factor de seguridad por corte

τ_A = Esfuerzo cortante actuante

σ' = Esfuerzo normal efectivo

c' = Cohesión efectiva

Tabla 2.7. Factores de seguridad por corte mínimos

Condición	Fs. corte Mínimo	
	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Nominal	1,5	1,25
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1,25	1,1
Carga Muerta + Carga Viva Nominal + Sismo de diseño Pseudo estático	1,1	1,00*
Taludes - condición estática y Agua Subterránea Normal	1,5	1,25
Taludes - condición pseudo estática con agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de diseño	1,05	1,00*

Fuente: NEC-SE-GC

La Carga Viva Nominal, se considera un factor de reducción por simultaneidad de la carga viva.

La Carga Viva Máxima no se considera un factor de reducción.

(*) La demanda sísmica para los análisis pseudo estáticos será del 60% de la aceleración máxima en el terreno. (NEC-SE-GC, 2014, pág. 32)

Se considera que un talud está en el punto de falla cuando el factor de seguridad es igual a uno o la resistencia al corte del suelo disponible equilibra exactamente el esfuerzo cortante inducido por la gravedad. Un talud tiene fuerza de reserva cuando $FS > 1$. En general, la probabilidad de falla disminuye a medida que aumenta el factor de seguridad. (Palate Bombón, 2018, pág. 20)

El factor de seguridad, calculado para el Análisis Estático (Equilibrio Límite y Elementos Finitos) nos indica que: (TARDEO DE LA CRUZ, 2016, pág. 45)

- Si el factor de seguridad es menor a la unidad ($FS < 1$), el talud es inestable o ya colapsado.
- Si el factor de seguridad es mayor a la unidad ($FS > 1$), el talud es estable.
- Si el factor de seguridad es igual a la unidad ($FS = 1$), el talud presenta el riesgo de una falla inminente.
- El factor de seguridad, calculado para el Análisis Dinámico (Elementos Finitos), tiene la siguiente premisa:
- El Reglamento Nacional de Estructuras en la Norma E, 050 recomienda que el Factor de Seguridad mínimo para taludes en condiciones sísmicas es de 1,2.

Tabla 2.8. Valoración de la estabilidad

Intervalo de clasificación de factores de seguridad	
Clasificación	FS. Estático
Inadmisible	$< 0,75$
Muy Bajo	$0,75 - 1,00$
Bajo	$1,00 - 1,25$
Aceptable	$1,2 - 1,50$
Ideal	$> 1,50$

Fuente: Evaluación de estabilidad de taludes de corte y terraplén, Sociedad Colombiana de Geotecnia y universidad nacional de Colombia

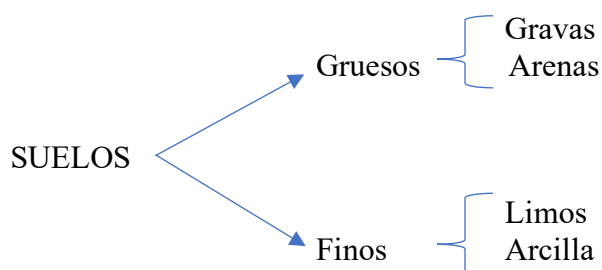
Tabla 2.9. Escalas recomendadas para la zonificación de amenazas por deslizamientos

Intervalos de clasificación de factores de seguridad	
Amenazas	FS. Estático
Muy alta	FS. < 1
Alta	FS. = 1
Moderada	FS. = 1,2
Baja	FS. = 1,5
Muy baja	FS. > 3

Fuente: Geominas Vol. 45, N° 74, diciembre 2017

2.17. Clasificación de los suelos

El suelo se clasifica según el tamaño de los granos que lo conforman.



2.17.1. Gruesos

Se considera un suelo grueso o granular aquel que no contiene la propiedad de adherirse las partículas entre sí, como ser las gravas y arenas. Contienen partículas más grandes lo cual producen mayor fricción entre ambas, produciendo menor resistencia al corte.

2.17.2. Finos

Un suelo fino se considera como un suelo cohesivo, por la presencia de arcillas que produce cierta adherencia por sus propiedades muy pequeñas y presenta menos probabilidades que se produzcan derrumbes.

Suelos orgánicos, son suelos esponjosos, con grumos y compresibles. Estos están prohibidos para soportes de estructuras de ingeniería.

2.18. Cohesión

Se define la cohesión, como una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo; además representa la resistencia al cortante producida por la cementación. En suelos granulares, no existe ningún tipo de material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a '0' y a estos suelos se los denomina como suelos no cohesivos. (TARDEO DE LA CRUZ, 2016, pág. 44)

Es la propiedad por la cual las partículas del terreno se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, que dependen, entre otras cosas del número de puntos de contacto que cada partícula tiene con sus vecinas. En consecuencia, la cohesión es mayor cuanto más finas son las partículas del terreno. (CHAPMAN, 2017, pág. 20)

2.19. Ángulo de fricción

Define el ángulo de fricción, como representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual depende de varios factores, los más importantes son: tamaño de granos, forma de granos, distribución de tamaño de granos y densidad. (TARDEO DE LA CRUZ, 2016, pág. 44)

Es una propiedad de los materiales granulares el cual tiene una interpretación física sencilla, al estar relacionado con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un conjunto de dicho material granular. En un material granuloso cualquiera, el ángulo de reposo está determinado por la fricción, la cohesión y la forma de las partículas son muy pequeñas en relación al tamaño de conjunto el ángulo de reposo coincide con el ángulo de rozamiento interno.

La fricción interna de un suelo está definida por el ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento, a lo largo de un plano, y la fuerza normal aplicada sobre dicho plano. (CHAPMAN, 2017, pág. 21)

Tabla 2.10. Valores de cohesión por tipo de suelo

Cohesión (KPa)	
Arcilla rígida	20 – 25
Arcilla semirrígida	8 – 12
Arcilla blanda	0 – 4
Arcilla arenosa	2 – 8
limo rígido o duro	0 – 5

Fuente: Carlos Enrique Chapman Lima Perú

Tabla 2.11. Valores de cohesión y ángulo de fricción interna en suelos

Tipos de suelos		Ángulo de fricción interna en grados	Cohesión C.
Granulares o no cohesivos	Arena suelta	30	
	Arena de compacidad media	32,5	
	Arena densa	35	
	Grava	35	
	Grava arenosa heterogénea	35	
	Bloques de piedra	35	
Suelos cohesivos	Arcilla semidura	15	0,25
	Arcillas firmes	16	0,1
	Arcillas blandas	17	0
	Arcilla arenosa firme	22,5	0,05
	Arcilla arenosa blando	23,5	0
	Limo firme	24,5	0,002
	Limo blando	25,5	0
	Arcilla orgánica, limo y cieno, no fibroso	10	0
	Turba	15	0

Fuente: Tomado de Terzaghi y Peck (1980)

Tabla 2.12. Valores típicos de ángulo de fricción y cohesión de suelos y rocas

Material		Ángulo de fricción (°)	Cohesión (Kpa)
Cohesivos	Montmorillonita (bentonita blanda)	7-13	10-20
	Arcilla inorgánica muy blanda	12-16	10-30
	Arcilla blanda, ligeramente inorgánica	22-27	20-50
	Arcilla blanda	27-32	30-70
	Arcilla rígida	30-32	70-150
	Rocas ígneas duras		
	Granito, basalto, pórfidos	35-45	35000-55000
	Rocas metamórficas		
	Cuarcita, neiss, pizarras	30-40	20000-40000
	Rocas sedimentarias duras		
	Lomolitas, dolomita, areniscas	34-45	10000-30000
	Rocas, sedimentarias blandas		
	Areniscas, carbón, lulita	25-35	1000-30000

Fuente: (Hoek y Bray 1991) manual de estabilidad de taludes p. 111

Tabla 2.13. Valores del ángulo de fricción

Tipos de suelo	Ángulo de fricción
Arenas:	
Seca-Suelta	28,5-34°
Suelta-Seca	28,5-34°
Densa-Seca	35-46°
Densa-Saturada	1-2° menos que densa-seca
Limos o arenas limosas:	
Sueltos	20-22°
Densos	25-30°
Arcilla saturada:	0°

Fuente: Bowles, J.E.

Tabla 2.14. Valores representativos para el ángulo de fricción interna ϕ

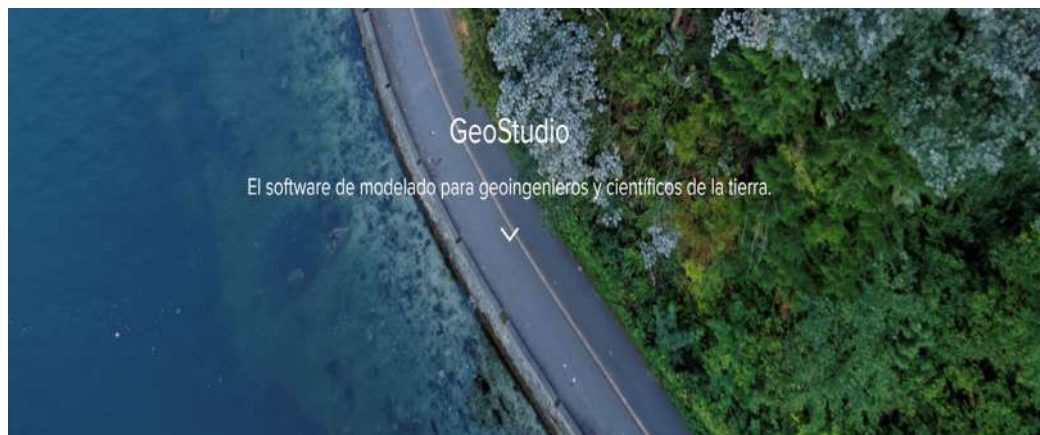
Type de test			
Soil	Unconsolidated- ungrained, U	Unconsolidated- ungrained, CU	Unconsolidated- drained, CD
Gravel			
Medium size	40-50°		40-55°
Sandy	35-50°		35°-50°
Sand			
Loose dry	28-34°		
Loose saturated	28-34°		
Dense dry	35-46°		43-50°
Dense Saturated	1-2° less than dense dry		43-50°
Silt or silty sand			
Loose	20-22°		27-30°
Dense	25-30°		30-35°
Clay	0° if saturated	3-20°	20-42°

Fuente: Bowles E.J. Foundation analysis and design pg. 668

En. Acar Et. Al. 1997

2. 20. Programa de cómputo GeoStudio 2018

Figura 2.29. Portada GeoStudio



Fuente: GeoStudio

¿Por qué elegir GeoStudio?

Capacidad analítica rigurosa. Integración sofisticada de productos. Amplia aplicación a diversos problemas de geoingeniería y ciencias de la tierra.

Figura 2.30. Características Geo/Slope

 <p>Combinar geometrías y análisis en un solo proyecto.</p> <p>GeoStudio le permite combinar análisis utilizando diferentes productos en un solo proyecto de modelado, utilizando los resultados de uno como punto de partida para otro. Múltiples geometrías, incluidas las geometrías 1D, 2D y 3D, también se pueden incluir en un solo archivo.</p>	 <p>Dibuje geometría directamente o importe archivos CAD</p> <p>GeoStudio proporciona muchas herramientas para definir el dominio del modelo, incluida la importación de coordenadas, la pasta de copias de elementos geométricos, la retroalimentación de longitud y ángulo, la fusión y división de regiones y la importación de archivos DWG / DXF. BUILD3D, la herramienta de creación de geometría 3D de GeoStudio, ofrece un conjunto completo de características de boceto.</p>	 <p>Resolver múltiples análisis simultáneamente</p> <p>GeoStudio ejecuta cada solucionador de análisis en paralelo, lo que permite resolver múltiples análisis de manera eficiente en computadoras con procesadores modernos y multinúcleo. Esto ahorra un tiempo de resolución sustancial, especialmente para grandes análisis 3D.</p>	 <p>Interprete los resultados con visualización y gráficos.</p> <p>GeoStudio proporciona potentes herramientas de visualización, que incluyen gráficos, parcelas de contorno, isolinias o isosuperficies, animaciones, consultas interactivas de datos y exportaciones de datos a hojas de cálculo para un análisis más detallado.</p>
---	---	---	---



Fuente: GeoStudio

2.20.1. Análisis de estabilidad de pendiente

SLOPE / W es el software líder de estabilidad de pendientes para pendientes de suelo y roca, analizando problemas simples y complejos para una variedad de formas de superficie deslizante, condiciones de presión de poro-agua, propiedades del suelo, y condiciones de carga.

Con esta amplia gama de características, SLOPE / W se pueden usar para analizar casi cualquier problema de estabilidad de pendientes que encuentre en sus proyectos de ingeniería geotécnica, civil y minera.

2.20.2. Formulación integral

SLOPE/W calculan el factor de seguridad de las pendientes de tierra y roca. Pueden analizar de manera efectiva problemas simples y complejos para una variedad de formas de superficie deslizante, condiciones de presión de agua porosa, propiedades del suelo y métodos de análisis. Usando el equilibrio límite, SLOPE/W pueden modelar tipos de suelo heterogéneos, geometría de superficie compleja estratigráfica y deslizante, y condiciones variables de presión de poro-agua utilizando una gran selección de modelos de suelo. Los análisis se pueden realizar utilizando parámetros de entrada deterministas o probabilísticos en SLOPE/W. Se pueden usar tensiones calculadas por un análisis de tensión de elementos finitos, además de los cálculos de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de pendiente más completo disponible.

2.20.3. Aplicaciones típicas

SLOPE / W pueden modelar casi cualquier problema de estabilidad, incluyendo:

- Suelo natural y laderas rocosas
- Excavaciones de construcción
- Presas y diques de tierra
- Highwalls a cielo abierto
- Estructuras de tierra reforzadas
- Diseño de estabilización de pendiente
- Pistas con recargo o carga sísmica
- Estabilidad de la presa durante la reducción rápida
- Pendientes parcialmente y totalmente sumergidas
- Laderas insaturadas sometidas a infiltración
- Estabilidad de la presa de relaves

2.20.4. Una elección de muchos métodos de análisis

SLOPE / W está formulado en términos de momento y factor de equilibrio de fuerza de ecuaciones de seguridad, y admite una lista completa de métodos de equilibrio de límites que incluyen Morgenstern-Price, Spencer, Bishop, Janbu, y el método ordinario. Del

mismo modo. El método Morgenstern-Price, por ejemplo, satisface tanto el equilibrio de fuerza como el de momento. Esta formulación general facilita la computación del factor de seguridad para una variedad de métodos y para comprender fácilmente las relaciones y diferencias entre todos los métodos.

SLOPE / W también puede realizar análisis de estabilidad dinámica y estabilidad dinámica basados en el estrés de elementos finitos. Utiliza tensiones calculadas de elementos finitos de SIGMA / W o QUAKE / W para calcular un factor de estabilidad calculando tanto la resistencia al corte total como el esfuerzo de corte movilizad o a lo largo de toda la superficie de deslizamiento. SLOPE / W luego calcula un factor de estabilidad local para cada corte.

2.20.5. Introducción

Esperando que este manual de introducción al programa Slope/W, sea útil a estudiantes de ingenierías, así como a profesionales de la geotecnia que quieren iniciarse en el uso este tipo de herramientas de cálculo, para usarlo en toma de decisiones dentro de los procedimientos de diseño de taludes de carreteras, ferrocarriles, presas de materiales suelos, etc.

El presente manual está basado en la versión 2018 r2, se encuentra disponible en el mercado libre y descarga por internet de la página oficial de GeoStudio: <http://www.geoslope.com>. Se puede obtener una versión para aprendizaje con algunas limitaciones de uso, este manual se adecua dicha versión, suficiente para introducirse en el uso del programa. Incluso en el momento de redacción de este texto, es posible bajarse una versión de prueba totalmente funcional durante 30 días.

Se ha de tener en cuenta que la versión Student o la de prueba de 30 días tal y como indica la empresa GeoSlope sólo es de aplicación para el aprendizaje y no para la realización de cálculos de gabinete, para lo cual existen otras versiones eso si de pago.

El uso de un programa de este estilo no sustituye al técnico, no toma las decisiones por este, sólo se limita a realizar cálculos que el técnico le indica, por lo que queda en sus manos:

El contenido de este manual se enfoca con los siguientes objetivos:

- Introducir geometrías
- Definir características de suelos
- Determinar hipótesis de proyecto

2.20.6. Método del equilibrio límite (MEL)

El método del equilibrio límite consiste en estudiar el equilibrio de un cuerpo rígido, constituido por el talud y por una superficie de deslizamiento de cualquier forma (línea recta, arco circular, espiral logarítmica). Con tal equilibrio se calculan las tensiones de corte (τ) y se comparan con la resistencia disponible (τ_f), valorada según el criterio de rotura de Coulomb; de tal comparación se deriva la primera indicación sobre la estabilidad con el coeficiente de seguridad $F = \tau_f / \tau$.

Entre los métodos del equilibrio último, algunos consideran el equilibrio global del cuerpo rígido (Culman), otros, por motivos de la ausencia de homogeneidad, dividen el cuerpo en rebanadas considerando el equilibrio de cada una.

2.20.7. Características del programa

El programa a cuyo uso nos vamos a introducir tiene fundamentalmente en su versión 2028 R2, de forma extendida, las siguientes características:

2.20.8. Métodos de análisis

- Bishop
- Spencer
- Fallenius
- Morgenstern-Price
- Janbu

2.20.9. Geometría y estratigrafía:

La introducción de los condicionantes geométricos son muy versátiles y se adaptan prácticamente a cualquier geometría:

- Geometría adaptable a cualquier contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones
- Definición de grietas de tracción
- Permite modelizar suelos parcialmente sumergidos

2.20.10. Superficies de deslizamiento:

Dispone de distintos sistemas de modelización de las superficies de rotura:

- Malla de centros y límites de radios
- Superficies de rotura poligonales, con o sin centro
- Por bloques.
- Zonas de entrada salida acotando los posibles círculos de rotura
- Optimización de búsqueda de superficies de rotura
- Posicionamiento automático de grietas de tracción

En la versión de estudiante sólo están disponibles los métodos

- Malla de centros y límites de radios
- Zonas de entrada y salida acotando los posibles radios de rotura

2.20.11. Presión hidrostática

Se puede modelizar las acciones de la presión de poro, en el terreno a través de los siguientes sistemas:

- Coeficiente de presión de agua, R_u
- Línea piezométrica
- Línea piezométrica con R_u
- Línea piezométrica con $B\text{-bar}$
- Función de altura piezométrica

Otros análisis basados en archivos de Seep, Sigma donde ya se han creado los campos de presiones de poro.

2.20.12. Propiedades de los suelos

Con objeto de modelizar el comportamiento de los suelos el programa dispone de varios modelos de comportamiento de los materiales implicados en el problema a solucionar entre otros:

- Modelo de Mohr-Coulomb
- Lecho de roca (Impenetrable)
- No drenado ($\varphi = 0$, $\tau = c$.)
- Modelo de rotura bilineal (Bilinear)
- Incrementos de la resistencia al corte con la profundidad
- Resistencia al corte anisótropa
- Criterios de rotura específicos

2.20.13. Tipos de cargas

- Cargas superficiales
- Cargas puntuales
- Cargas sísmicas
- Líneas de refuerzo
- Conjuntos de refuerzo

CAPÍTULO III CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

3.1. Ubicación

El estudio está ubicado en el departamento de Tarija en la provincia Aniceto Arce en el tramo de la carretera Padcaya – Río Negro, aproximadamente 70 km de la ciudad de Tarija.

Figura 3.1. Mapa político de Tarija



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.2. Imagen satelital Google Earth



Fuente: Elaboración propia

3.2. Características generales del área del proyecto

Padcaya, primera sección de la provincia Arce, se encuentra en la ruta que comunica la ciudad de Tarija con la localidad fronteriza de Bermejo, en el límite con Argentina.

El pueblo de Padcaya se encuentra a 50 km. al sur de Tarija y a 148 km. al norte de Bermejo. Desde estas dos ciudades hay servicios de buses y transportes de pasajeros. La carretera entre estas ciudades se encuentra asfaltada. El pueblo se ubica a una altura 2041 msnm.

La topografía del municipio es irregular, con sectores montañosos rodeados de paisajes de valles situados entre los 1.660 y 2.200 msnm, donde se destacan los valles comprendidos entre Padcaya, Rosillas y Orozas.

3.3. Identificación de taludes críticos

Tabla 3.1. Identificación de rasgos característicos que indican la posibilidad de un derrumbe

Tipo de factores por su naturaleza	Indicadores antecedentes	Indicadores potenciales
Geomorfológicos	Existencia de conos coluviales o fragmentos angulosos, zonas de acumulación al pie del acantilado.	Terreno en pequeñas depresiones, relieve ondulado, apertura de grietas en el terreno
Geológicos	Afloramientos rocosos fuertemente fracturados (diaclasas, fallas, juntas), rocas alteradas.	
Vegetación	Ausencia de cubierta vegetal en zonas activas, por el contrario, en zonas inactivas existe abundante vegetación.	Presencia de árboles sobre las zonas rocosas.
Toponimia	Toponimia. - Muchas áreas de derrumbes tienen nombres sugerentes como: El Derrumbadero, El Pedregal, Las Piedras, etc.	
Historia	Históricos. - Testimonios o documentos de eventos pasados.	

Fuente: Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI)

Este estudio nace debido a las constantes problemáticas e inseguridad que vive el servicio del autotransporte público interprovincial Tarija-Bermejo, que hoy en día presenta cierta incertidumbre al momento de realizar estos viajes, debido a los derrumbes que se presenta en este tramo carretero y más aún, en época de lluvia es más probable que ocurra este fenómeno de desequilibrio de partículas, produciendo los deslizamientos. La identificación y selección de los taludes más desfavorables, se realizó de manera de sondeo, con los mismos señores conductores de servicios del autotransporte, recabando varios testimonios de experiencias vividas en su vida laboral, que hayan presenciado inconvenientes, perjuicio y riesgos de ser protagonistas de accidentes, producto por el tema de deslizamiento de taludes.

3.3.1. Descripción de los tramos en estudio

En primer lugar, se procedió a ubicar las zonas de estudio en el tramo carretero de acuerdo a sectores donde existan los taludes de mayor riesgo de inestabilidad, y de los diferentes tipos de suelos que los componen.

A continuación, se elabora una descripción de los lugares de interés, de acuerdo a la progresiva real de la vía.

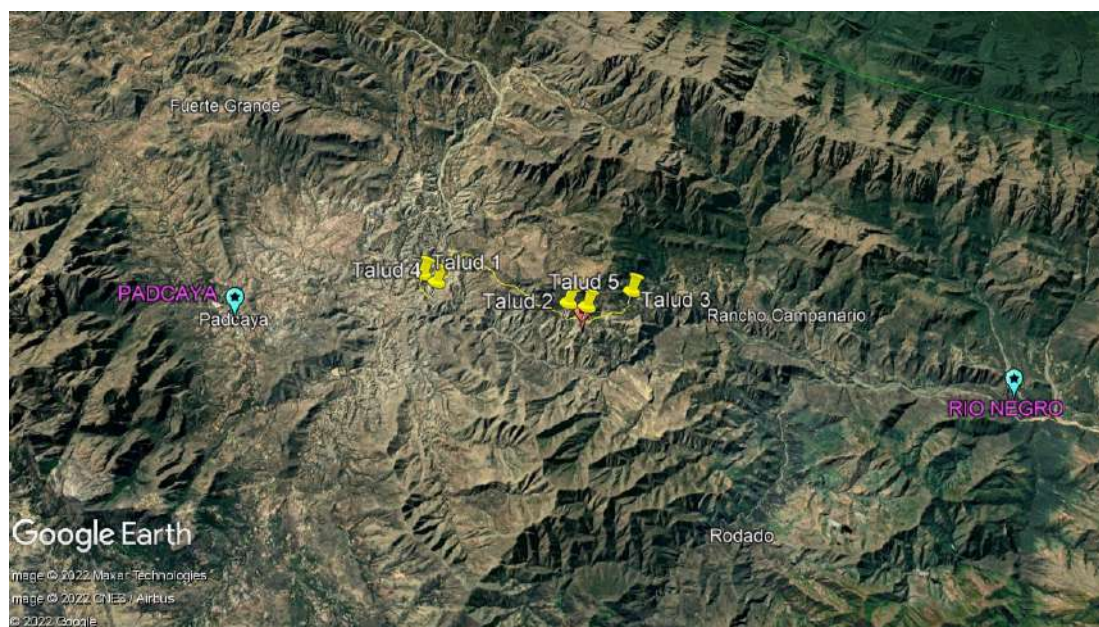
Tabla 3.2. Valoración de la estabilidad

Progresiva km.		Punto interés	Observaciones
Inicio	Fin		
0+000	0+078	Talud N°1	Talud de gran altura con mucho material suelto arenoso, ubicada sobre la bajada hacia el puente Orozas de aprox. 78 m de longitud, sobre la carretera
7+104	7+199	Talud N°2	Talud de gran altura, con desprendimiento de material arcilla consolidada de aprox. 95 m de longitud, sobre la carretera.
9+337	9+460	Talud N°3	Talud de gran altura, con material suelto arcilloso. Ubicada cerca al colegio de Guayabillas, con una

			longitud aprox. de 123 m, sobre la carretera.
0+582	0+615	Talud N°4	Talud con altura considerable con material arcilla limosa, ubicada pasando el puente Orozas de aprox. 33 m de longitud, sobre la carretera.
7+599	7+881	Talud N°5	Talud con desprendimiento de material suelo arcilloso ubicada en la comunidad de Guayabillas, con una longitud aprox. de 282 m, sobre la carretera.

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3. Ubicación de los taludes en estudio



Fuente: Imagen satelital Google Earth

Los puntos o taludes en análisis del estudio, se encuentran ubicados en el tramo carretero Padcaya-Río Negro, camino hacia el extremo sur de Tarija.

Talud N°1.- En coordenadas 21°56'0.43"S (latitud); 64°41'17.74"O (longitud), a una altura de 1973 msnm.

Talud N°2.- En coordenadas $21^{\circ}58'26,47''\text{S}$ (latitud); $64^{\circ}41'10,24''\text{O}$ (longitud), a una altura de 2132 msnm.

Talud N°3.- En coordenadas $21^{\circ}59'23,63''\text{S}$ (latitud); $64^{\circ}40'38,09''\text{O}$ (longitud), a una altura de 2020 msnm.

Talud N°4.- En coordenadas $21^{\circ}58'26,45''\text{S}$ (latitud); $64^{\circ}41'10,24''\text{O}$ (longitud), a una altura de 2132 msnm

Talud N°5.- En coordenadas $21^{\circ}58'44,79''\text{S}$ (latitud); $64^{\circ}41'10,24''\text{O}$ (longitud), a una altura de 2105 msnm.

3.4. Levantamiento topográfico

Se realizó el levantamiento topográfico en los 5 taludes de mayor riesgo de estabilidad descrito anteriormente con progresivas y coordenadas, luego se procedió a determinar los parámetros básicos de la geometría, como la altura vertical (h), la longitud horizontal (L) y la pendiente del plano del talud.

Para el levantamiento topográfico se utilizó los siguientes equipos, una estación total Sokkia Set 5x y un navegador GPS-Garmin.

Figura 3.4. Levantamiento topográfico estación total Sokkia Set 5x



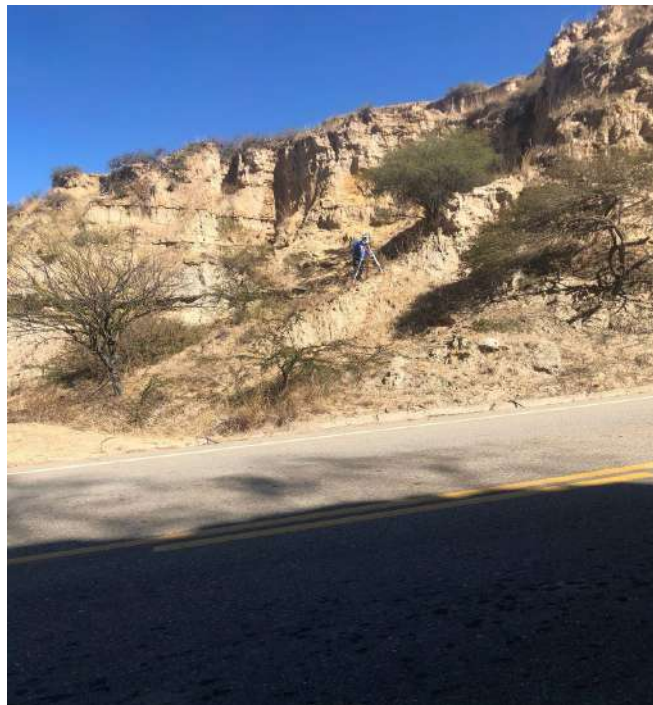
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5. Levantamiento topográfico talud N°4



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6. Levantamiento topográfico talud N°1



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3. Referencia levantamiento topográfico

Punto Interés	Progresiva km		Longitud de proyección		Coordenadas UTM		Área de corte m ²
			m				
	Inicio	Fin	Long.	Altura	Este	Norte	
Talud N°1	0+000	0+078	78	17,19	325636,77	7573578,97	597,02
Talud N°2	7+104	7+199	95	8,1872	325901,00	7569090,00	412,91
Talud N°3	9+337	9+460	123	25,3342	326843,00	7567342,00	1239,89
Talud N°4	0+582	0+615	33	16,2377	325522,00	7573109,00	313,54
Talud N°5	7+599	7+881	282	13,6684	325957,00	7568527,00	172,83

Fuente: Elaboración propia

La distancia desde el primer talud hasta el último es de 9,46 km.

La distancia del tramo Padcaya-Río Negro es de 34 km.

3.5. Recolección de muestras

Conociendo las ubicaciones de los taludes en estudio, se procedió a la obtención de las muestras de suelos para la caracterización correspondiente de cada una de ellas.

Para el estudio de cada talud se extrajo tres muestras de las tres partes del talud, pie, cuerpo, cabeza.

La recolecta de muestra, se hizo de forma manual, excavando con ayuda de una picota y una pala. Una vez extraída el material, lo introducimos en bolsas de yute, identificadas con las nomenclaturas de cada talud y su ubicación de la extracción.

Figura 3.7. Extracción de muestra talud N°1 (cabeza)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8. Extracción de muestra talud N°5 (cabeza)



Fuente: Elaboración propia

3.6. Ensayo de caracterización de los agregados

Para realizar la caracterización de los agregados utilizados en la determinación del factor de seguridad, se asistió al laboratorio de Suelos de la (U.A.J.M.S), donde se realizaron los ensayos de Granulometría, Límites de Atterberg (Líquido y Plástico), Contenido de humedad, Peso específico, Corte directo.

3.7. Granulometría

Primeramente, se efectúa un muestreo para el agregado, mediante el cuarteo que consiste en colocar a la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas.

La muestra escogida de agregado, se coloca en una bandeja para determinar la masa de la bandeja y la muestra.

Tomamos la muestra, se coloca sobre los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 200, inmediatamente con movimientos circulares facilitamos que el agregado pueda retenerse o pasar en cada uno de los tamices. Los resultados del ensayo se dan en porcentajes del peso total del agregado que pasa cada tamiz de dimensiones conocidas, para lo cual se pesan las respectivas cantidades retenidas y sumadas en forma acumulativa a las anteriores de tamaño mayor, estos pesos acumulados se dividen por el peso total de la muestra ensayada y se multiplica por 100. La diferencia a 100 de cada uno de estos porcentajes acumulados nos da porcentaje que deja pasar el tamiz correspondiente.

Equipo y materiales:

- Balanza
- Cuchara
- Juego de mallas o tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 200 charola de fondo y tapa.
- Charola de lámina galvanizada.
- Platos
- Brocha pequeña.
- Horno

Figura 3.9. Ensayo granulométrico del talud N°(4-1)



Fuente: Elaboración propia

3.7.1. Ensayo de laboratorio análisis granulométrico

Análisis granulométrico por tamices

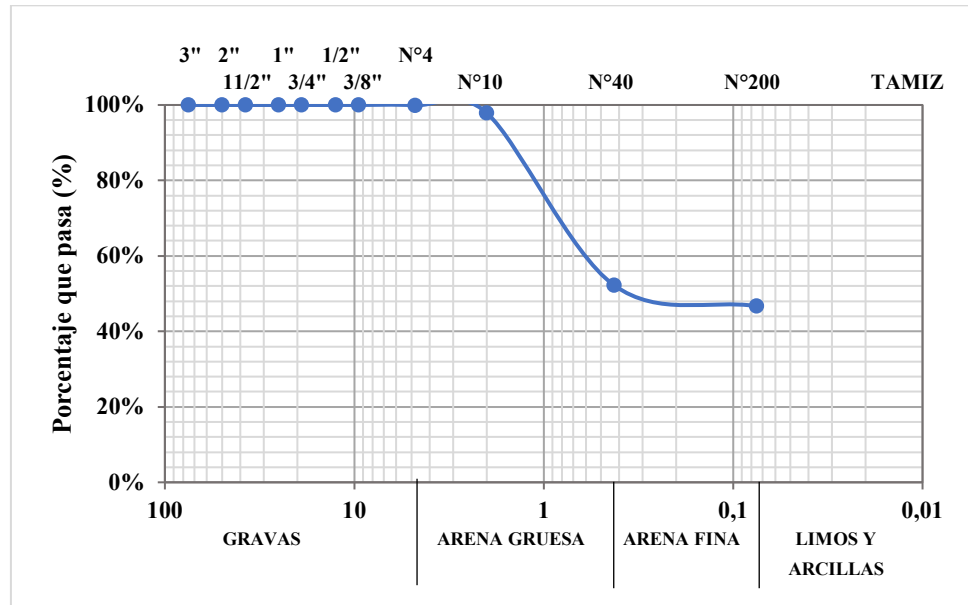
Proyecto:	Análisis del programa de estabilidad de taludes Geo/Slope aplicando al tramo Padcaya – Río Negro	Identificación:
		Suelo natural
Elaborado por:	Univ. Andia Manuel Edwin Noel	Talud 1-1

Tabla 3.4. Tabla de muestras y resultados en laboratorio

Peso Total (gr):		500	A.S.T.M.	
Tamiz N°	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	% peso ret	% peso ret. acum.
3"	75	0,00	0,00	100,00
2"	50	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	0,00	0,00	100,00
N°4	4,75	0,50	0,10	99,90
N°10	2,00	9,90	2,08	97,92
N°40	0,425	228,5	47,78	52,22
N°200	0,075	27,6	53,30	46,70
Base		0,00	53,30	46,70

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10. Curva granulométrica



Fuente: Elaboración propia

3.8. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos, aunque su comportamiento varíe con el pasar del tiempo.

Los límites se basan en el concepto de que un suelo de grano fino solo puede existir cuatro estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

3.8.1. Límite líquido

Esta propiedad se determina en laboratorio, mediante un procedimiento normalizado en que una muestra de suelo y agua, son depositadas en la cuchara de Casagrande o Copa de Casagrande y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela, hasta que el surco que previamente se ha recortado, se cierre en una longitud de 12 mm si el número de golpes para que se cierre el surco es 25, la humedad del suelo

(razón peso de agua/peso de suelo seco) corresponde al límite líquido. Dado que no siempre es posible que el surco se cierre en la longitud de 12 mm exactamente con 25 golpes.

Equipo y materiales:

- Equipo Casagrande
- Ranurador
- Espátula
- Brocha
- Taras
- Balanza

Figura 3.11. Ensayo limite líquido del talud N°(1-2)



Fuente: Elaboración propia

3.8.2. Límite plástico

Es la frontera comprendida entre el estado plástico y semisólido. Se define como el contenido de humedad que posee un cilindro de material en estudio de 3 mm de diámetro, (formado al rotarlo con ya sea con la palma de la mano sobre una superficie de vidrio) hasta presentar agrietamientos en su estructura.

Equipo y materiales:

- Base de vidrio
- Taras
- Espátula
- Balanza
- Horno

Figura 3.12. Ensayo limite plástico del talud N°(3-1)



Fuente: Elaboración propia

3.8.3. Ensayo de laboratorio análisis de límite líquido

Límites de Atterberg

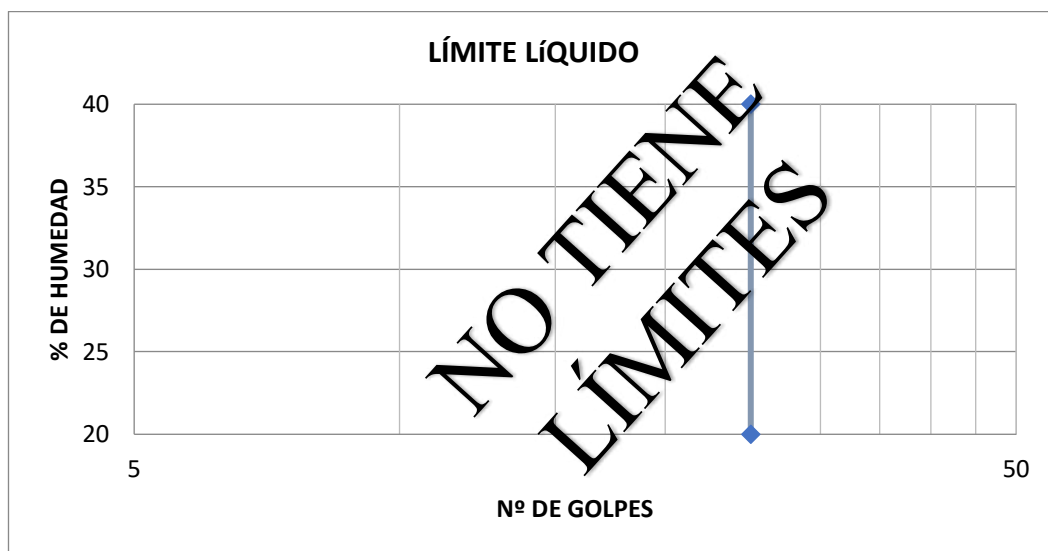
Proyecto:	Análisis del programa de estabilidad de taludes Geo/Slope aplicando al tramo Padcaya - Río Negro	Identificación:
		Suelo natural
Elaborado por:	Univ. Andia Manuel Edwin Noel	Talud 1-2

Tabla 3.5. Muestras y resultados límite líquido

Capsula N°					
N° de golpes					
Suelo Húmedo + Cápsula					
Suelo Seco + Cápsula					
Peso del agua					
Peso de la Cápsula					
Peso Suelo seco					
Porcentaje de Humedad					

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.13. Línea de tendencia límite líquido



Fuente: Elaboración propia

3.8.4. Ensayo de laboratorio análisis de límite plástico

Tabla 3.6. Muestras y resultados limite plástico

Cápsula	1	2	3	Límite Líquido (LL)
Peso de suelo húmedo + Cápsula				
Peso de suelo seco + Cápsula				Límite Plástico (LP)
Peso de cápsula				
Peso de suelo seco				Índice de plasticidad (IP)
Peso del agua				
Contenido de humedad				Índice de Grupo (IG) 2

Fuente: Elaboración propia

3.9. Contenido de humedad

Determinar la cantidad de agua que posee una muestra de suelo, con respecto al peso seco de la muestra.

Contenido de humedad, es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas.

Equipo y materiales:

- Fuente
- Cuchara
- Taras
- Balanza
- Horno

Figura 3.14. Ensayo contenido de humedad del talud N°(5-3)



Fuente: Elaboración propia

3.9.1. Ensayo de laboratorio análisis de contenido de humedad

Humedad natural y clasificación

Proyecto:	Análisis del programa de estabilidad de taludes Geo/Slope aplicando al tramo Padcaya - Río Negro	Identificación:
Elaborado por:	Univ. Andía Manuel Edwin Noel	Suelo natural Talud 1-1

Tabla 3.7. Muestras y resultados contenido de humedad

HUMEDAD NATURAL			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	191,10	156,10	137,70
Peso de suelo seco + Cápsula	188,60	153,80	136,20
Peso de cápsula	17,90	18	17,80
Peso de suelo seco	170,70	135,80	118,40
Peso del agua	2,50	2,30	1,50
Contenido de humedad	1,46	1,69	1,27

PROMEDIO | **1,48** |

CLASIFICACIÓN DEL SUELO		DESCRIPCIÓN
SUCS:	SM	Suelo arenoso con presencia de arena fina y limo inorgánico.
AASHTO:	A-4 (2)	

Fuente: Elaboración propia

3.10. Peso específico

Determinar la densidad de una arena y/o un suelo fino (dado que es el mismo procedimiento para ambos suelos), empleando para ello un matraz de fondo plano, con su correspondiente curva de calibración.

Generalmente la variación de la densidad de sólidos es de 2,60 a 2,80, aunque existen excepciones como en el caso de la turba en la que se han registrado valores de 1,5 y aún menores, debido a la presencia de materia orgánica. En cambio, en suelos con cierta cantidad de minerales de hierro la densidad de sólidos ha llegado a 3.

El Peso específico relativo de los sólidos es una propiedad índice que debe determinarse a todos los suelos, debido a que este valor interviene en la mayor parte de los cálculos relacionados con la Mecánica de suelos, en forma relativa, con los diversos valores determinados en el laboratorio pueden clasificarse algunos materiales.

Equipo y materiales:

- Fuente
- Cuchara
- Matraz
- Pipeta
- Espátula
- Termómetro
- Platos
- Embudo
- Cocinilla eléctrica

- Hielo
- Balanza
- Probeta
- Brocha
- Rociador

Figura 3.15. Ensayo contenido de humedad del talud N°(3-3)



Fuente: Elaboración propia

3.10.1. Ensayo de laboratorio análisis de peso específico

Calibración del frasco volumétrico

Peso del matraz 1: 181,60 gr
 Peso del matraz 2: 178 gr

Tabla 3.8. Tipos de temperatura y muestra en el frasco 1

Temperatura °C	Peso Frasco más agua gr
12	674,70
20	674,80
30	675,20
40	675,50

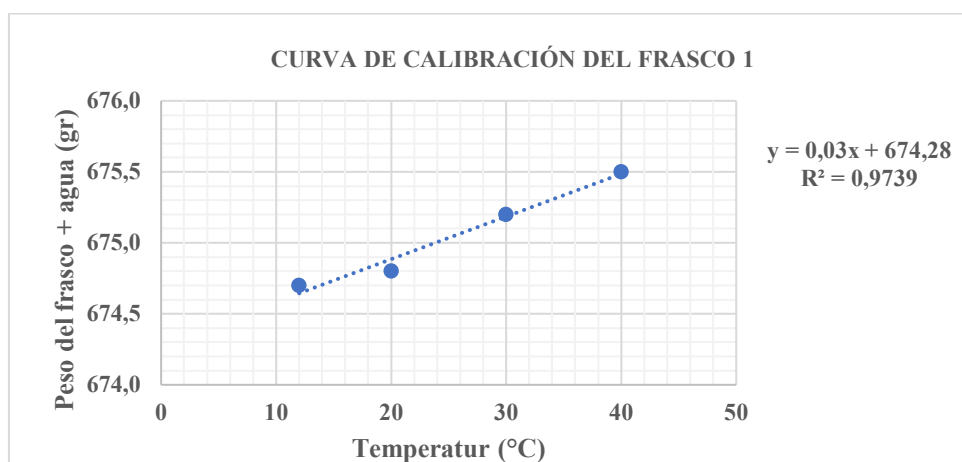
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9. Tipos de temperatura y muestra en el frasco 2

Temperatura °C	Peso Frasco más agua gr
10	672,60
20	672,80
30	672,90
40	673,10

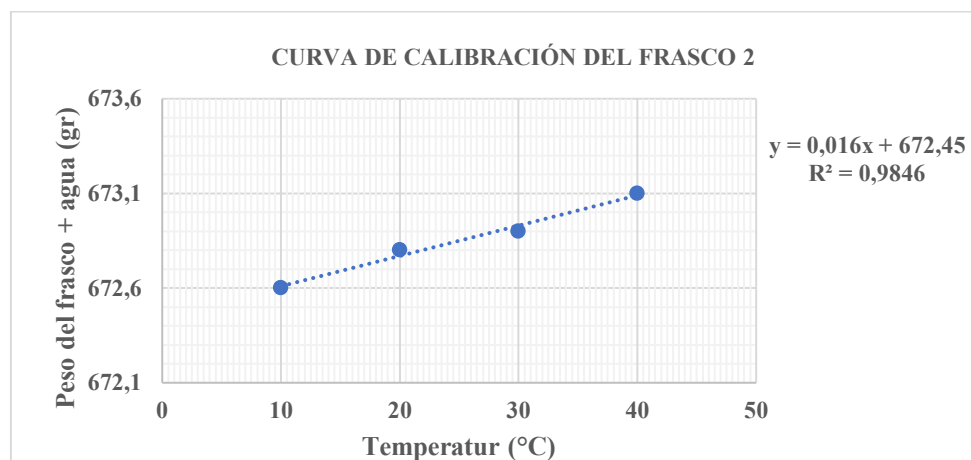
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16. Curva de calibración del frasco 1 peso específico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.17. Curva de calibración del frasco 2 peso específico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10. Muestras y resultados peso específico

Peso específico relativo

Identificación del frasco	1	2	3	4
Temperatura ensayada (°C)	40	30	20	10
Peso de suelo seco más tara	326,70			
Peso de la tara (gr)	248,20			
Peso del suelo seco W_s (gr)	78,50	78,50	78,50	78,50
peso del frasco más agua W_{fw} (gr)	675,48	675,18	674,88	674,58
peso del frasco + agua + suelo W_{fws}	725,70	725,20	725,10	724,80
Peso específico	2,78	2,76	2,78	2,78
Factor de corrección k	0,9944	0,9974	1,0000	1,0013
Peso específico corregido	2,76	2,75	2,78	2,78
Promedio	2,77			

Fuente: Elaboración propia

3.11. Corte directo

Tiene por objetivo establecer el procedimiento de ensayo, para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, por el método del corte directo. Este ensayo puede realizarse sobre todos los tipos de suelos, con muestras inalteradas y remoldeadas.

Este ensayo consiste en obtener bloques grandes, donde nos permita moldear las muestras de manera uniforme a una caja de dimensión estándar que posee la máquina de corte de $5.8 \text{ cm}^2 \times 20$ a 25 mm de espesor, cualquier muestra con un peso apreciablemente diferente de las otras debe descartarse y en su lugar moldear otra muestra.

Se debe dejar reposar la caja del equipo saturada con agua durante 24 hrs. Para posteriormente determinar los esfuerzos cortantes en relación al esfuerzo normal y a la deformación horizontal.

Equipo y materiales:

- Fuente

- Cierra metálica
- Lija
- Balanza
- Espátula
- Brocha
- Equipo corte directo

Figura 3.18. Realizando el molde de muestra para el ensayo de corte directo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.19. Sincronizando el equipo de corte directo



Fuente: Elaboración propia

3.11.1. Ensayo de laboratorio análisis de esfuerzo cortante

Esfuerzo cortante

Proyecto:	Análisis del programa de estabilidad de taludes Geo/Slope aplicando al tramo Padcaya - Río Negro	Identificación:
		Suelo natural
Elaborado por:	Univ. Andia Manuel Edwin Noel	Talud 1-1

Tabla 3.11. Muestras y resultados análisis esfuerzo cortante

Lectura Horizontal	Lectura Ext. Vertical			Lectura anillo de carga			Deformación horizontal (mm)	Deformación vertical (mm)			Fuerza cortante (Kg)			Esfuerzo cortante (Kg/cm ²)		
	1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00		1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00
0	0	0	0	0	0	3	0	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
10	1	4	1	2	3,5	4	0,254	0,003	0,010	0,003	5,52	6,79	7,21	0,16	0,20	0,21
20	2	6,5	4	4	6	8,5	0,508	0,005	0,017	0,010	7,21	8,89	11,00	0,21	0,26	0,33
30	3	7	6,5	5,5	7,5	12	0,762	0,008	0,018	0,017	8,47	10,16	13,95	0,25	0,30	0,41
40	5	8	8,5	6	9	14,5	1,016	0,013	0,020	0,022	8,89	11,42	16,06	0,26	0,34	0,48
50	7	10,5	12	6,5	11	18	1,27	0,018	0,027	0,030	9,31	13,11	19,01	0,28	0,39	0,57
60	10	13,5	14	7	13	19	1,524	0,025	0,034	0,036	9,74	14,79	19,85	0,29	0,44	0,59
70	13	16	19	8	14	20	1,778	0,033	0,041	0,048	10,58	15,64	20,70	0,31	0,46	0,62
80	15	21	23	8,5	15,5	20,5	2,032	0,038	0,053	0,058	11,00	16,90	21,12	0,33	0,50	0,63
90	16	24	27,5	9	16	21	2,286	0,041	0,061	0,070	11,42	17,32	21,54	0,34	0,51	0,64
100	17,5	28	30	10	16,5	21,5	2,54	0,044	0,071	0,076	12,27	17,74	21,96	0,36	0,53	0,65
110	18	30,5	33,5	11	17	22	2,794	0,046	0,077	0,085	13,11	18,17	22,38	0,39	0,54	0,67
120	18,5	37	38,5	12,5	18	22,5	3,048	0,047	0,094	0,098	14,37	19,01	22,80	0,43	0,57	0,68
130	21	39	41	14,5	19	23	3,302	0,053	0,099	0,104	16,06	19,85	23,22	0,48	0,59	0,69
140	23	43,5	45	14	20	24	3,556	0,058	0,110	0,114	15,64	20,70	24,07	0,46	0,62	0,72
150	24	44	48	14	20,5	25,5	3,81	0,061	0,112	0,122	15,64	21,12	25,33	0,46	0,63	0,75
160	25	44	52	14	21	26	4,064	0,064	0,112	0,132	15,64	21,54	25,75	0,46	0,64	0,77
170		44	55		20	27	4,318		0,112	0,140		20,70	26,60		0,62	0,79
180		44	58		20	28	4,572		0,112	0,147		20,70	27,44		0,62	0,82
190			57			27	4,826			0,145			26,60			0,79
200			57			27	5,08			0,145			26,60			0,79
210																

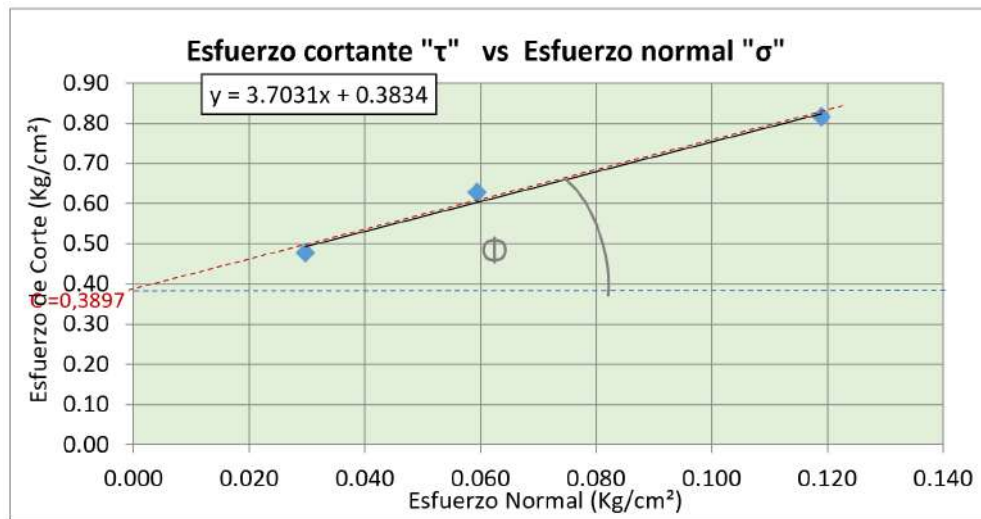
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12. Esfuerzos normales y cortantes corte directo

Esfuerzo Normal (Kg/cm ²)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)
0,03	0,48
0,06	0,63
0,12	0,82

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20. Envolventes de falla corte directo



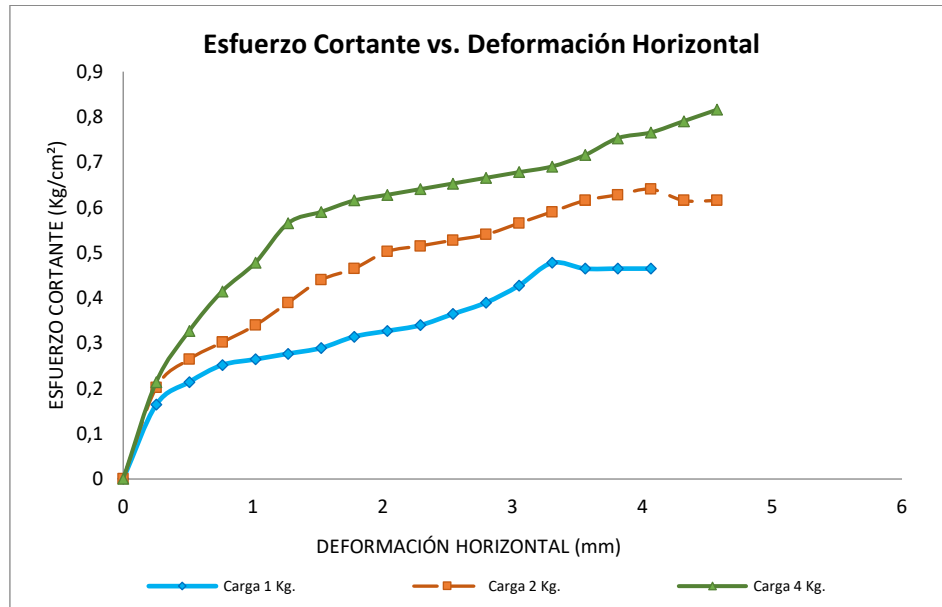
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13. Resultado cohesión y ángulo de fricción corte directo

Cohesión (Kg/cm ²)	Φ
0,3897	37

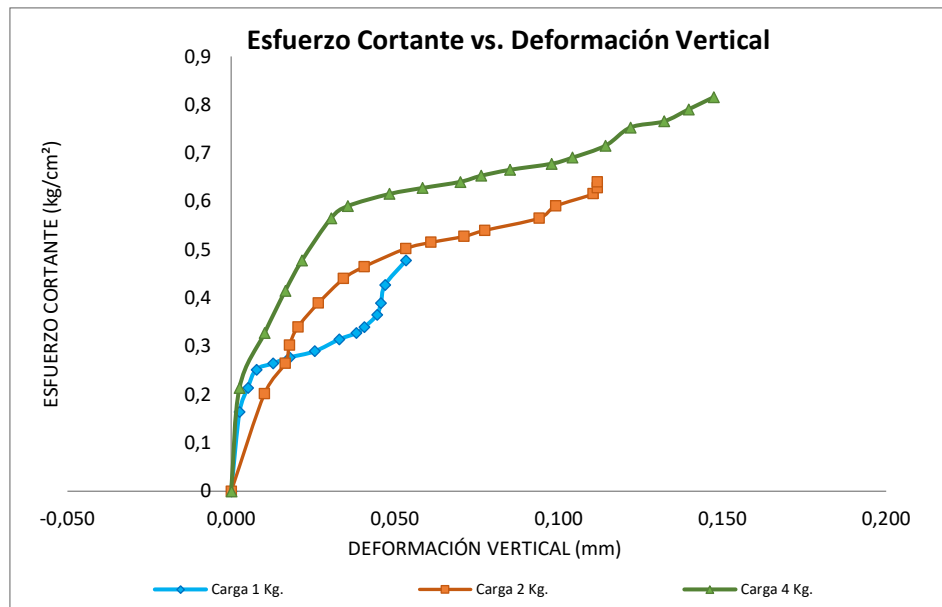
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21. Curva carga y deformación corte directo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22. Curva de carga y deformación corte directo



Fuente: Elaboración propia

3.12. Tabla de resultado de laboratorio

Tabla 3.14. Tabla de resultados de laboratorio para la aplicación al programa Geo/Slope

N° de Taludes	Identificación	Peso específico (g/cm ³)	Peso específico (KN/m ³)	Cohesión (Kg/cm ²)	Cohesión (KN/m ²)	Ángulo de fricción interna (f)°
Talud N°1	Pie	2,77	27,16	0,39	38,15	37
	Cuerpo	2,79	27,36	0,19	18,54	41
	Corona	2,73	26,77	0,06	5,59	43
Talud N°2	Pie	2,81	27,56	0,43	42,46	33
	Cuerpo	2,80	27,46	0,54	52,96	33
	Corona	2,72	26,67	0,72	70,71	38
Talud N°3	Pie	2,79	27,36	0,55	53,54	32
	Cuerpo	2,81	27,56	0,63	61,49	30
	Corona	2,80	27,46	0,78	76,88	36
Talud N°4	Pie	2,83	27,75	0,67	65,81	24
	Cuerpo	2,84	27,85	0,90	88,55	31
	Corona	2,75	26,97	0,43	42,46	40
Talud N°5	Pie	2,77	27,16	0,35	34,52	36
	Cuerpo	2,79	27,36	0,45	43,74	39
	Corona	2,84	27,85	0,61	59,62	38

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

CÁLCULOS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES

4.1. Ejemplos de cálculo del factor de seguridad de forma manual

Para los ejemplos de cálculos a realizar, se tomará como referencia los datos del talud N.º 1,3,4. También cabe recalcar, se realizará únicamente el cálculo manual de los métodos Bishop Simplificado, Fellenius y Janbu Simplificado.

4.1.1. Método de Bishop

Bishop (1955) presentó un método utilizando Dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las Dovelas. La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo a la expresión:

$$F. S. = \sum \frac{(C' * b + (W - ub) * \tan \frac{\phi'}{ma})}{\sum w * \text{sen } \alpha}$$

Parámetros necesarios para el cálculo del factor de seguridad del talud Nº1.

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas del talud Nº1

Nº de Taludes	Identificación	Peso específico (g/cm³)	Peso específico (KN/m³)	Cohesión (Kg/cm²)	Cohesión (KN/m²)	Ángulo de fricción interna (f)°
Talud Nº1	Pie	2,77	27,16	0,39	38,15	37,00
	Cuerpo	2,79	27,36	0,19	18,53	41,00
	Corona	2,73	26,77	0,06	5,59	43,00

Fuente: Elaboración propia

Donde:

$$ma = \cos \alpha \left(1 + \frac{\{\tan \alpha * \tan \phi\}}{F.S} \right)$$

b = Ancho de la dovela

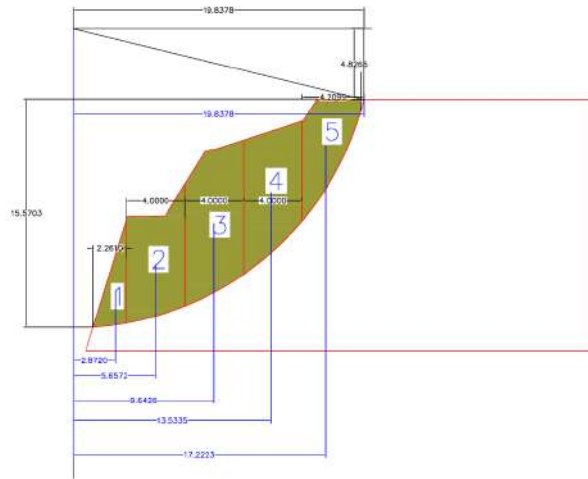
W = Peso de cada dovela

$C' \phi$ = Parámetros de resistencia del suelo

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $w\gamma * hw$

α = Ángulo del radio de la vertical en cada dovela

Figura 4.1. Perfil de la sección transversal talud N°1



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2. Tabla procedimiento de cálculo manual para el FS. del talud N°1

radio (m)		19,84										
Dovela N°	b (m) ancho de la dovela	a (m)	$\alpha = \sin^{-1} \frac{a}{r}$ $\alpha = (^\circ)$	$\Delta l = \frac{b}{\cos \alpha}$ Δl (m)	Área húmeda (m ²)	y_h (KN/m ³)	Área saturada (m ²)	y_{sat} (KN/m ³)	W (KN/m)	c' (KN/m ²)	Φ' (°)	
1	2,26	2,87	8,32	2,29	8,08	27,16	0,00	0,00	219,35	38,15	37,00	
2	4,00	5,66	16,57	4,17	28,68	27,16	0,00	0,00	779,15	38,15	37,00	
3	4,00	9,64	29,08	4,58	37,79	27,36	0,00	0,00	1.034,08	18,53	41,00	
4	4,00	13,53	43,02	5,47	32,71	27,36	0,00	0,00	894,90	18,53	41,00	
5	4,20	17,22	60,25	8,46	19,99	26,77	0,00	0,00	535,04	5,59	43,00	
$hw_{(i)}$ (m)	$hw_{(d)}$ (m)	$hw_{(prom)}$ (m)	u presión de poro (KN/m ²)	$c' \Delta l \cos \alpha + (w-u\Delta l * \cos \alpha) \tan \Phi'$			ma	M_{Rn} Momento Resistente (KN/n-m)	M_n Momento Actuante			
0,00	0,00	0,00	0,00	251,54			1,05	238,75	31,73			
0,00	0,00	0,00	0,00	739,72			1,08	681,84	222,19			
0,00	0,00	0,00	0,00	973,05			1,12	866,88	502,64			
0,00	0,00	0,00	0,00	852,06			1,08	788,94	610,51			
0,00	0,00	0,00	0,00	522,41			0,97	537,18	464,50			
							Σ	3.113,59	1.831,56			

Fso

1,70

FS

1,70

Fuente: Elaboración propia

$$W = A_h * \gamma_h + A_{sat} * \gamma_{sat} \qquad u = h w_{prom} * \gamma_{agua}$$

$$ma = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha * \tan \varphi'}{FS_0}$$

$$FS. = \frac{M_R}{M} = \frac{\sum \left(\frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W - u \Delta l \cos \alpha) \tan \varphi'}{ma} \right)}{\sum W \sin \alpha}$$

Tabla 4.3. Factor de seguridad talud N°1

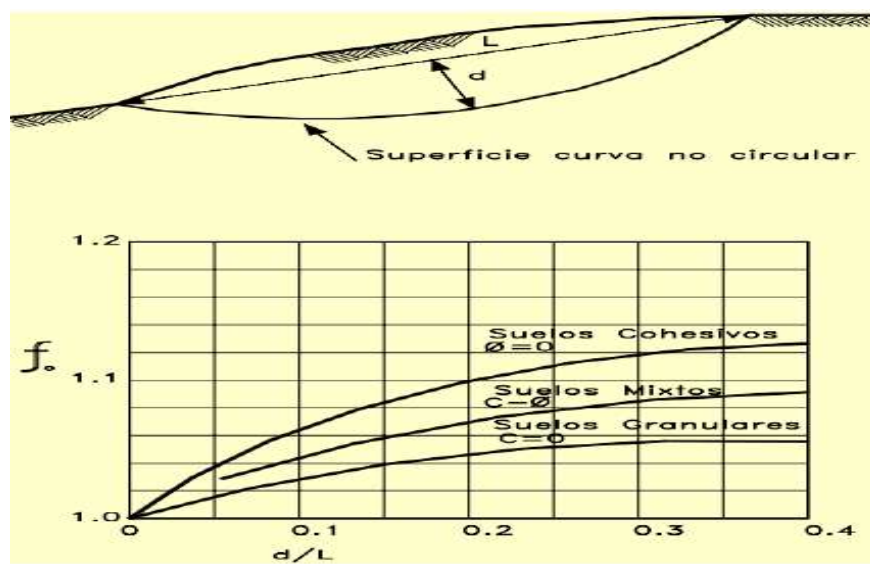
Proceso Iterativo	Fso	FS.
1	1,00	1,45
2	1,45	1,63
3	1,68	1,69
4	1,69	1,70
5	1,70	1,70

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Método de Janbu

Parámetros necesarios para el cálculo del factor de seguridad del talud N°3.

Tabla 4.4. Ábaco método Janbu



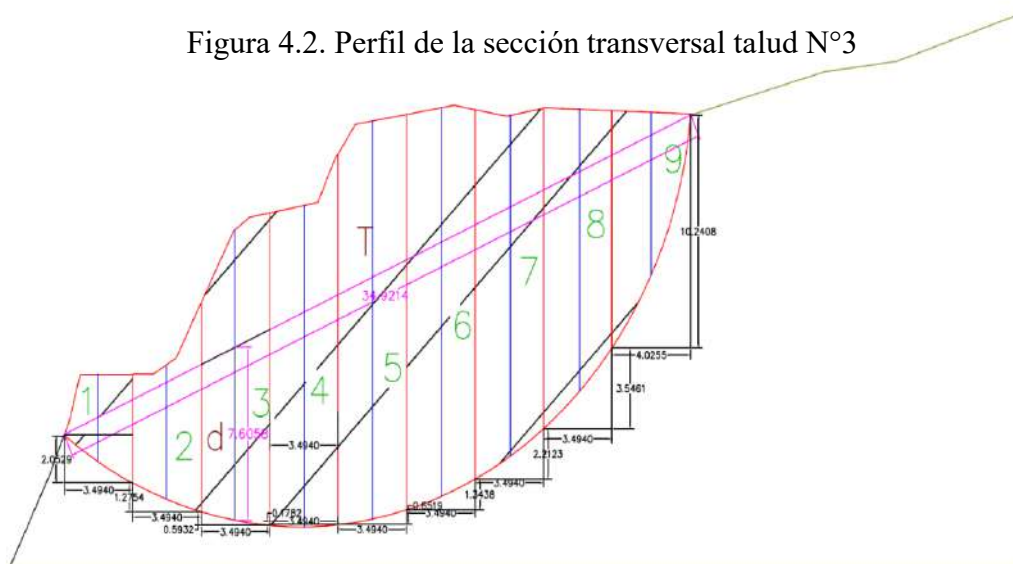
Fuente: Suarez, Díaz (1998)

Tabla 4.5. Propiedades mecánicas del talud N°3

N° de Taludes	Identificación	Peso específico (g/cm ³)	Peso específico (KN/m ³)	Cohesión (Kg/cm ²)	Cohesión (KN/m ²)	Ángulo de fricción interna (f)°
Talud N°3	Pie	2,79	27,36	0,55	53,54	32,00
	Cuerpo	2,81	27,56	0,63	61,49	30,00
	Corona	2,80	27,46	0,78	76,88	36,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2. Perfil de la sección transversal talud N°3



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6. Tabla procedimiento de cálculo manual para el FS. del talud N°3

Dovela	b (m)	h (m)	h _w (m)	α (°)	u	Φ°	y' (KN/m ³)	c (KN/m ²)
1	3,49	3,81	0,00	30,41	0,00	32,00	27,36	53,54
2	3,49	5,85	0,00	20,04	0,00	32,00	27,36	53,54
3	3,49	12,75	0,00	9,59	0,00	32,00	27,36	53,54
4	3,49	14,10	0,00	2,91	0,00	30,00	27,56	61,49
5	3,49	17,48	0,00	10,55	0,00	30,00	27,56	61,49
6	3,49	17,07	0,00	21,04	0,00	30,00	27,56	61,49
7	3,49	14,96	0,00	32,35	0,00	36,00	27,46	76,88
8	3,49	12,37	0,00	45,47	0,00	36,00	27,46	76,88
9	3,49	7,15	0,00	68,58	0,00	36,00	27,46	76,88

h (m ²)	w (KN/m)	1ra iteración	2da iteración	3ra iteración	4ta iteración	5ta iteración
12,09	330,89	399,28	393,94	396,57	396,57	395,34
21,98	601,35	535,67	533,76	534,70	534,70	534,26
42,64	1166,69	860,20	859,89	860,04	860,04	859,97
50,02	1378,44	921,14	921,13	921,14	921,14	921,13
60,46	1666,19	1108,22	1107,72	1107,97	1107,97	1107,85
59,35	1635,58	1169,43	1165,00	1167,20	1167,20	1166,18
52,70	1447,03	1624,94	1592,31	1608,31	1608,31	1600,84
43,36	1190,58	1868,81	1752,27	1808,07	1808,07	1781,70
26,76	734,88	2289,42	1804,83	2015,91	2015,91	1911,94
Σ	10151,63	10777,11	10130,85	10419,90	10419,90	10279,22

Fuente: Elaboración propia

$$\frac{d}{T} = \frac{7.61}{34.92} = 0,217$$

$$f_0 = 1 + k \left(\frac{d}{T} - 1.4 \left(\frac{d}{T} \right)^2 \right)$$

$$f_0 = 1,0623$$

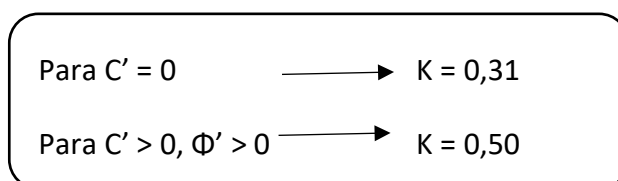


Tabla 4.7. Factor de seguridad talud N°5

Iteraciones					
FS. (asumido)	1,00	1,13	1,06	1,09	1,08
FS. (Calculado)	1,13	1,06	1,09	1,08	1,08

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Método de Fallenius

Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de los momentos con respecto al centro del círculo (producidos por estas fuerzas) se obtiene el factor de seguridad.

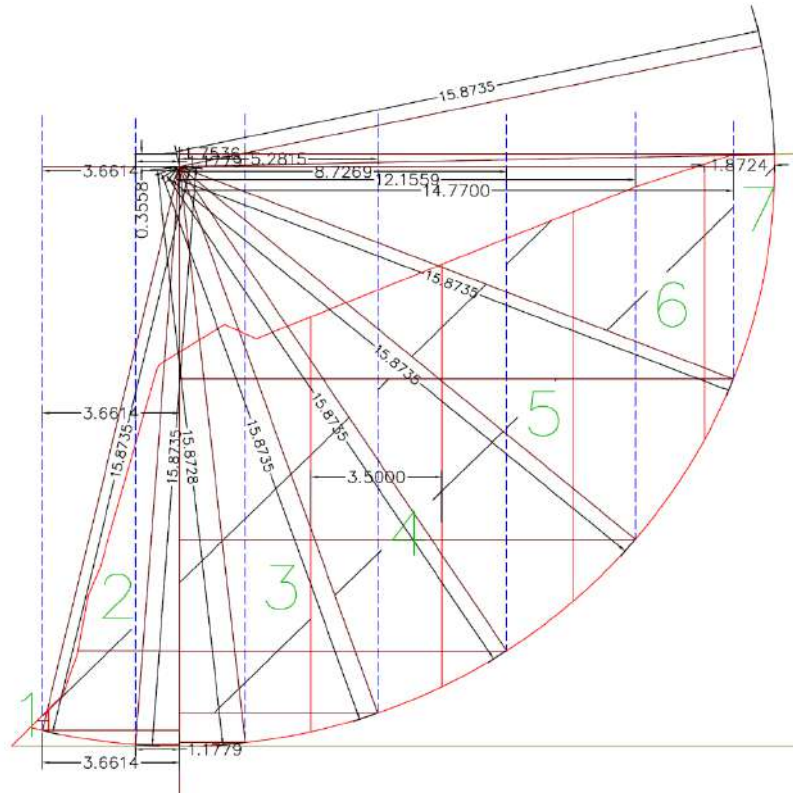
Parámetros necesarios para el cálculo del factor de seguridad del talud N°4.

Tabla 4.8. Propiedades mecánicas del talud N°4

N° de Taludes	Identificación	Peso específico (g/cm ³)	Peso específico (KN/m ³)	Cohesión (Kg/cm ²)	Cohesión (KN/m ²)	Ángulo de fricción interna (f)°
Talud N°4	Pie	2,83	27,75	0,67	65,80	24,00
	Cuerpo	2,84	27,85	0,90	88,55	31,00
	Corona	2,75	26,97	0,43	42,46	40,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3. Perfil de la sección transversal talud N°4



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9. Tabla procedimiento de cálculo manual para el FS. del talud N°4

Dovela	a	R	a/R	α(°)	Dovela	b	α(°)	cos α	Δl
1	-3,66	15,87	-0,23	-13,33	1	0,29	-13,33	0,97	0,30
2	-1,18	15,87	-0,07	-4,26	2	3,50	-4,26	1,00	3,51
3	1,75	15,87	0,11	6,34	3	3,50	6,34	0,99	3,52
4	5,28	15,87	0,33	19,44	4	3,50	19,44	0,94	3,71
5	8,73	15,87	0,55	33,36	5	3,50	33,36	0,84	4,19
6	12,16	15,87	0,77	49,99	6	3,50	49,99	0,64	5,44
7	14,77	15,87	0,93	68,54	7	1,87	68,54	0,37	5,11

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.10. Tabla general de resultados del cálculo manual talud N°4

DOVELA	b (m)	α (°)	Δl	ÁREA	y _{hum}	C	φ	W	Mr	Mm
1	0,29	-13,33	0,30	0,15	27,75	65,80	24,00	4,16	-0,96	2141
2	3,50	-4,26	3,51	21,10	27,75	65,80	24,00	585,53	-43,54	490,91
3	3,50	6,34	3,52	39,11	27,85	88,55	31,00	1089,21	120,35	962,29
4	3,50	19,44	3,71	40,42	27,85	88,55	31,00	1125,70	374,63	966,49
5	3,50	33,36	4,19	39,32	26,97	42,46	40,00	1060,46	583,15	921,14
6	3,50	49,99	5,44	32,95	29,97	42,46	40,00	987,51	756,40	763,87
7	1,87	68,54	5,11	9,97	26,97	42,46	40,00	268,89	250,25	299,59
								Σ	2040,28	4425,70

Fuente: Elaboración propia

$$W = A_h * \gamma_h + A_{sat} * \gamma_{sat}$$

$$FS. = \frac{M_R}{M} = \frac{\sum \left(\frac{c' * \Delta l + (W * \cos \alpha - u \Delta l \cos^2 \alpha) \tan \phi'}{ma} \right)}{\sum W \sin \alpha}$$

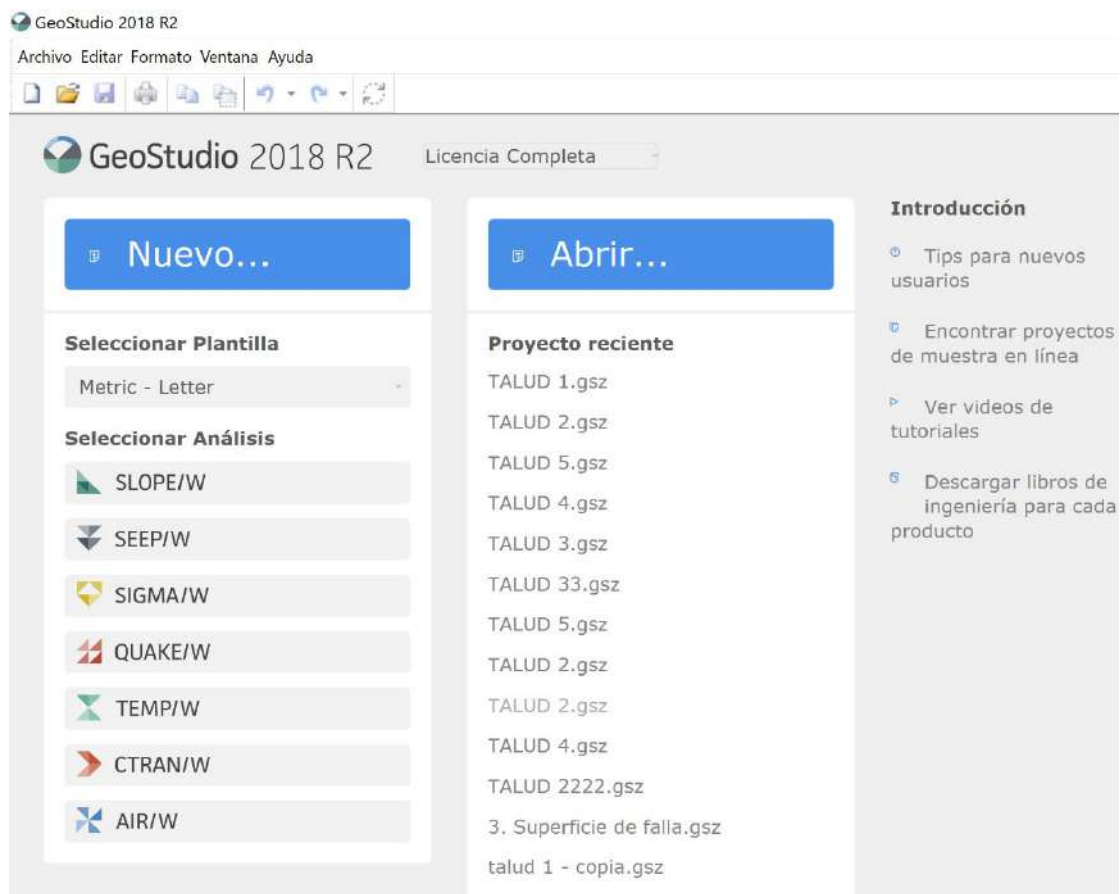
$$FS. = \frac{2040,28}{4425,70}$$

$$FS. = 0,46$$

4.2. Aplicación del programa Geo/Slope en el talud N°1 (ejemplo)

Ingresando al programa GeoStudio, podemos observar el interfaz del programa y entre las pestañas tenemos selección de plantilla y como el tipo de análisis a ejecutar. también se puede observar los proyectos recientemente ejecutados y poderlas abrir de manera más rápida, al lado derecho encontramos algunos videos tutoriales o proyectos subidos en línea.

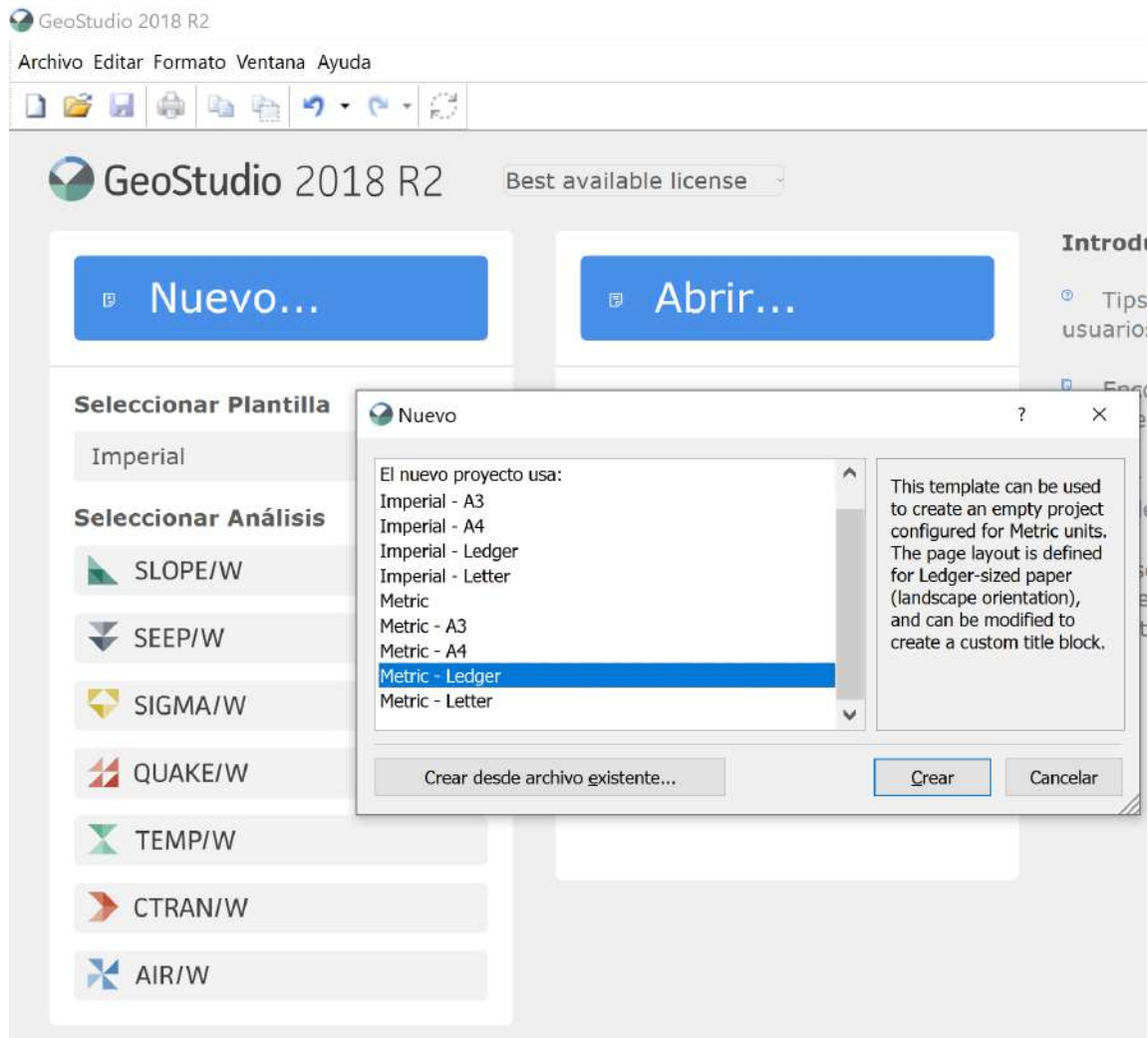
Figura 4.4. Interfaz del programa Geo/Slope



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Posteriormente seleccionamos la opción "nuevo" y nos saldrá en pantalla los tipos de unidades métricas y tamaño de plantilla, creamos en el sistema métrico y carta.

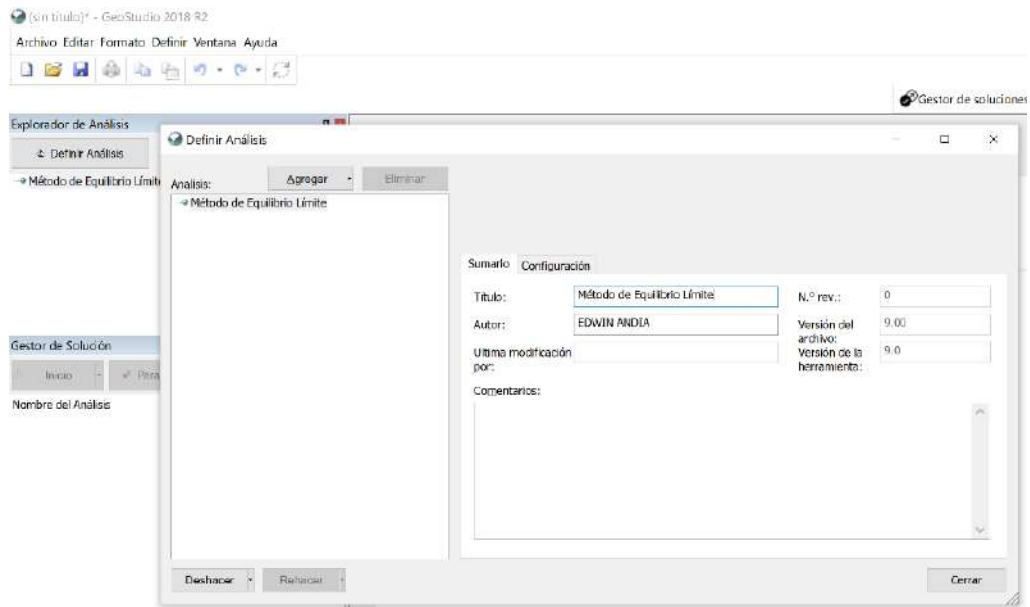
Figura 4.5. Sistema de unidades y plantilla



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

En definir análisis podemos editar desde el título del proyecto, autor, fecha y adicionar algunas observaciones que se requieran mencionar.

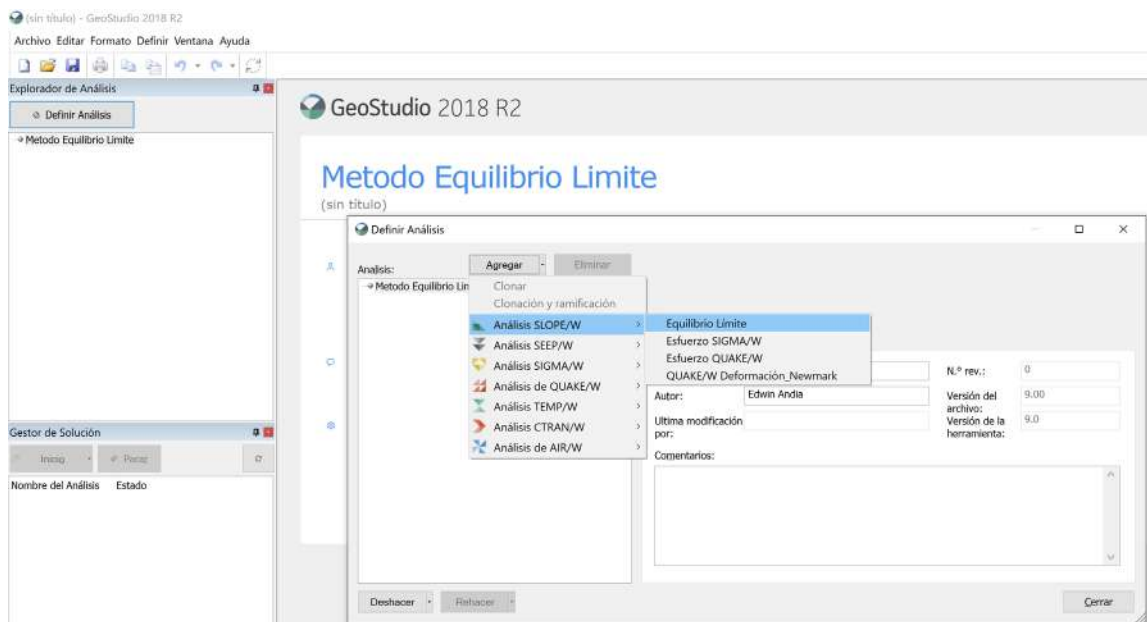
Figura 4.6. Creación del proyecto y autor



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Ingresando al icono de agregar, podemos observar varios tipos de análisis para diferentes fines, para nuestro estudio corresponde el análisis de taludes es decir Slope/W de equilibrio límite.

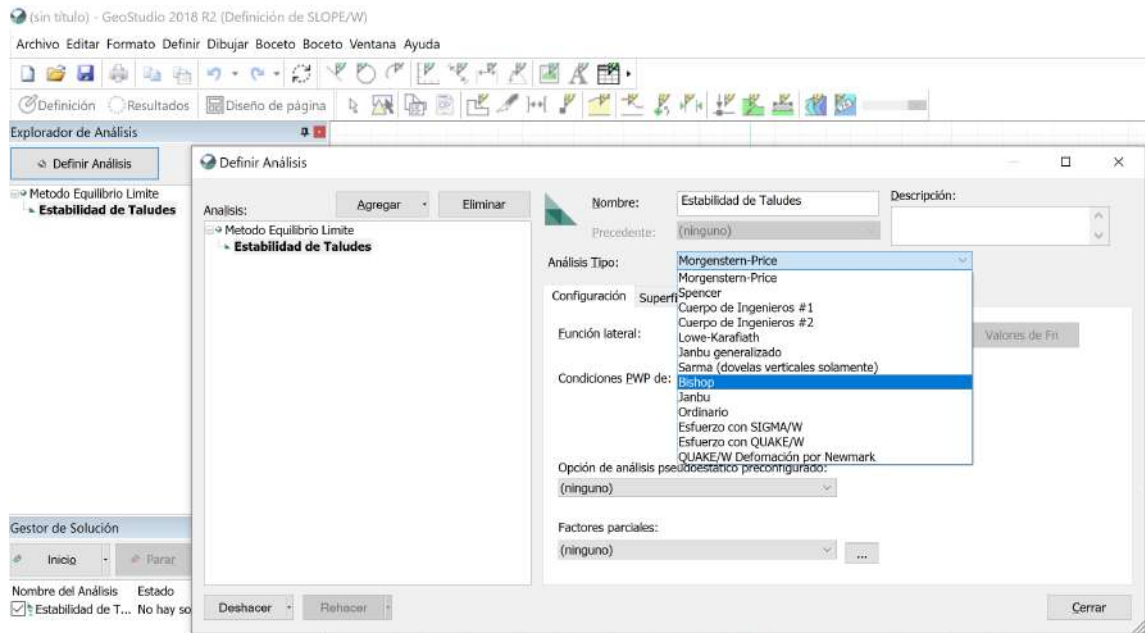
Figura 4.7. Análisis Slope/W (Equilibrio límite)



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

En la pestaña de tipo de análisis observamos la variedad de métodos de análisis por diferentes autores. Entre los conocidos, Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price, Sarma, etc. Será netamente criterio del calculista elegir cualquier de los métodos de análisis. Para este estudio se realizó con los métodos más conocidos y poder observar las variaciones de resultados entre uno y los otros.

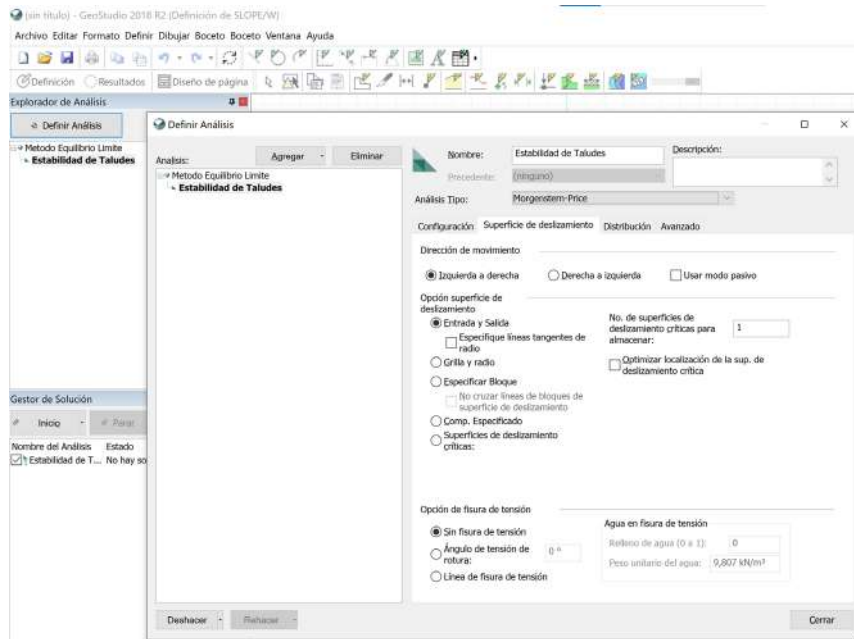
Figura 4.8. Tipos de análisis



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

En el programa, existe varios tipos de análisis de deslizamiento, entre ellas esta mediante grilla y radio, especificar bloque, composición especificada, superficie de deslizamiento crítica y entrada y salida. Para este estudio el análisis más recomendable a usar es el de entrada y salida y posteriormente seleccionaremos optimizar localización de la superficie de deslizamiento crítica y sin fisura de tensión.

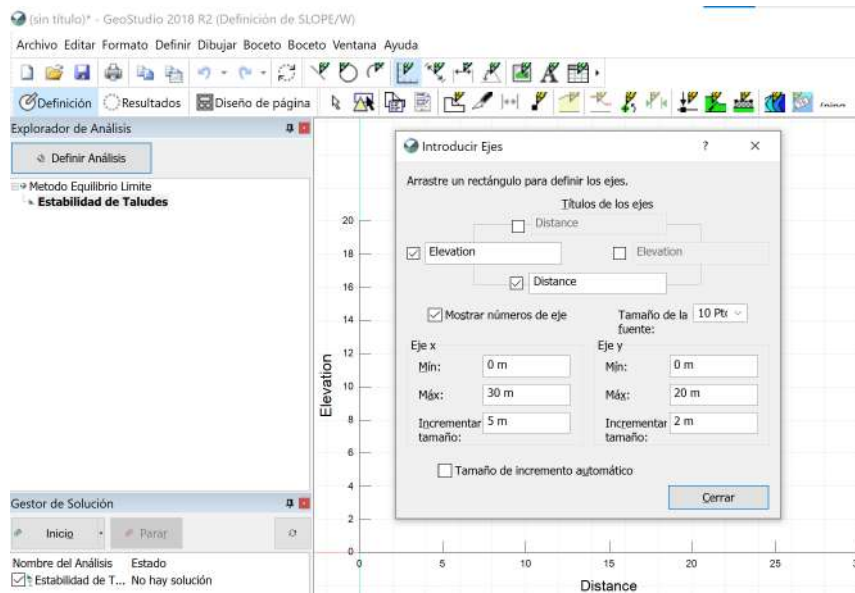
Figura 4.9. Selección del tipo de análisis de deslizamiento



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Una vez ya tenida los parámetros y detalles de análisis de cálculo, procedemos a entrar a la ventana del programa, donde dibujamos nuestros ejes de coordenadas X y Y, con intervalos y distancias de acuerdo a nuestra sección del perfil de talud.

Figura 4.10. Dibujo de ejes cartesianos



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Posteriormente en la pestaña de "definir" ubicada en la parte superior, encontramos el icono de "puntos" donde agregamos todos nuestros puntos del perfil del talud en X y Y, para realizar su gráfica de su sección transversal correspondiente.

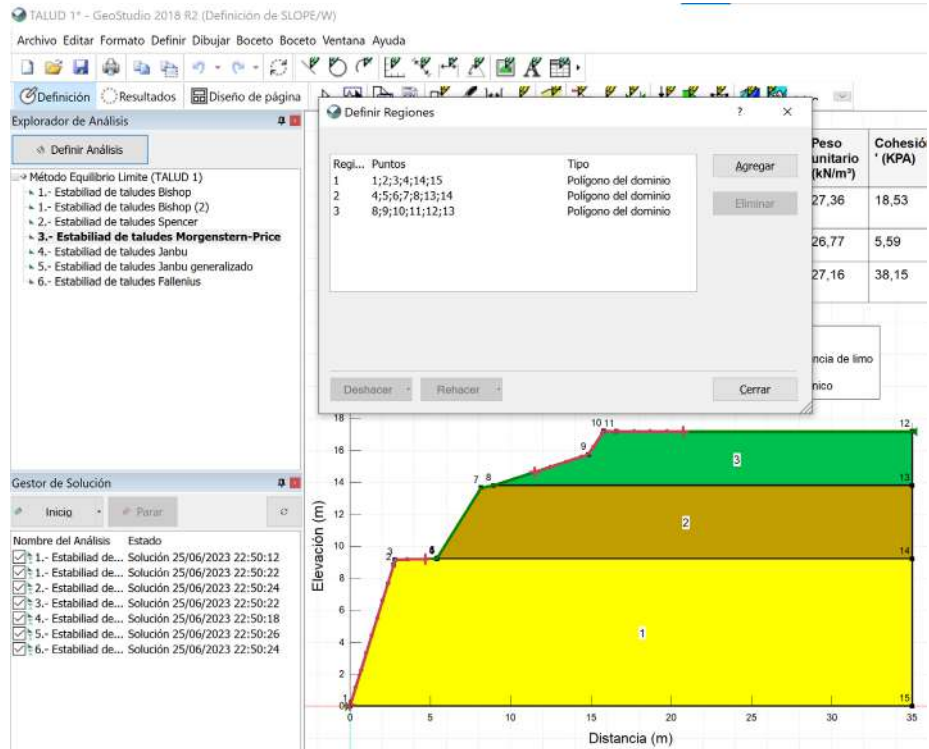
Tabla 4.11. Puntos exportados de civil 3D para graficar en Geo/Slope (Talud N°1)

Punto	Progresiva (m)	Elevación (m)
1	0,00	0,00
2	0,91	1,84
3	1,11	2,53
4	4,05	9,45
5	4,47	10,28
6	6,76	11,97
7	7,12	12,65
8	8,51	13,67
9	14,14	13,16
10	18,33	11,04
11	22,88	9,44
12	25,50	9,39
13	29,10	10,73
14	30,31	10,60
15	31,48	10,34
16	34,55	9,05
17	40,00	9,05
18	40,00	0,00
19	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Una vez introducido los puntos del perfil, proseguimos en la pestaña de "dibujo" dibujar las regiones, es decir empezamos a dividir el talud en tres extractos de suelos, cabeza, cuerpo y pie.

Figura 4.11. Dibujo de contornos



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

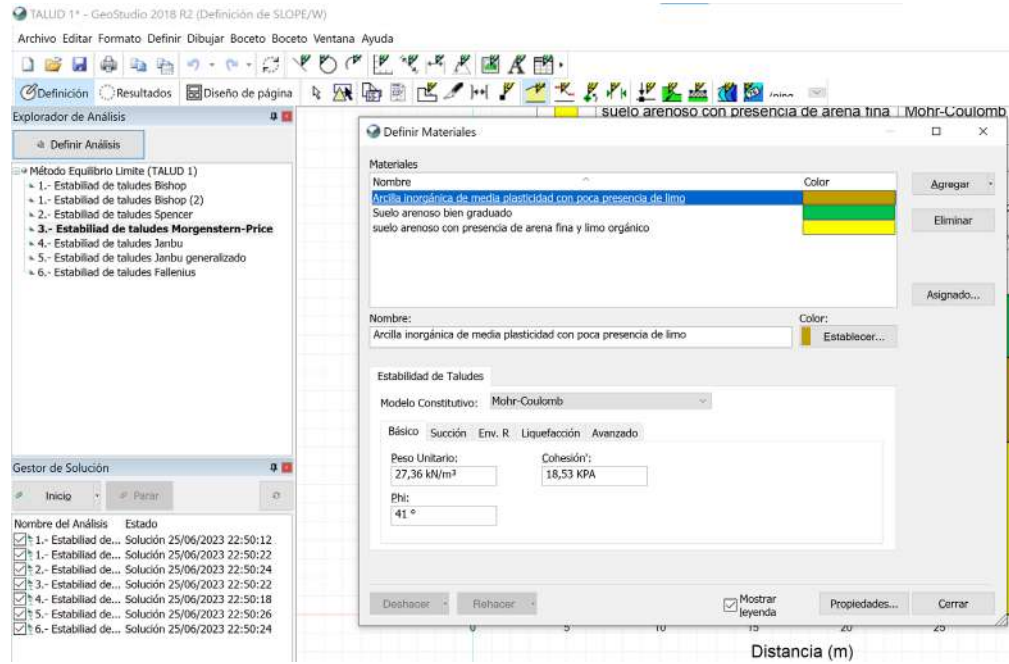
En el la pestaña de "definir" podemos encontrar una pantalla, seleccionamos agregar y podremos colocar los tres extractos de suelos obtenidos en campo. Donde cada extracto se los denomina de acuerdo a su clasificación de suelo y añadiendo sus características mecánicas prescindibles para el cálculo de análisis del talud, peso específico, cohesión y ángulo de fricción.

Tabla 4.12. Características mecánicas del suelo (Talud N°1)

N° de Taludes	Identificación	Peso específico (g/cm³)	Peso específico (KN/m³)	Cohesión (Kg/cm²)	Cohesión (KN/m²)	Ángulo de fricción interna (f)°
Talud N°1	Pie	2,77	27,16	0,39	38,15	37,00
	Cuerpo	2,79	27,36	0,19	18,53	41,00
	Corona	2,73	26,77	0,06	5,59	43,00

Fuente: Elaboración propia

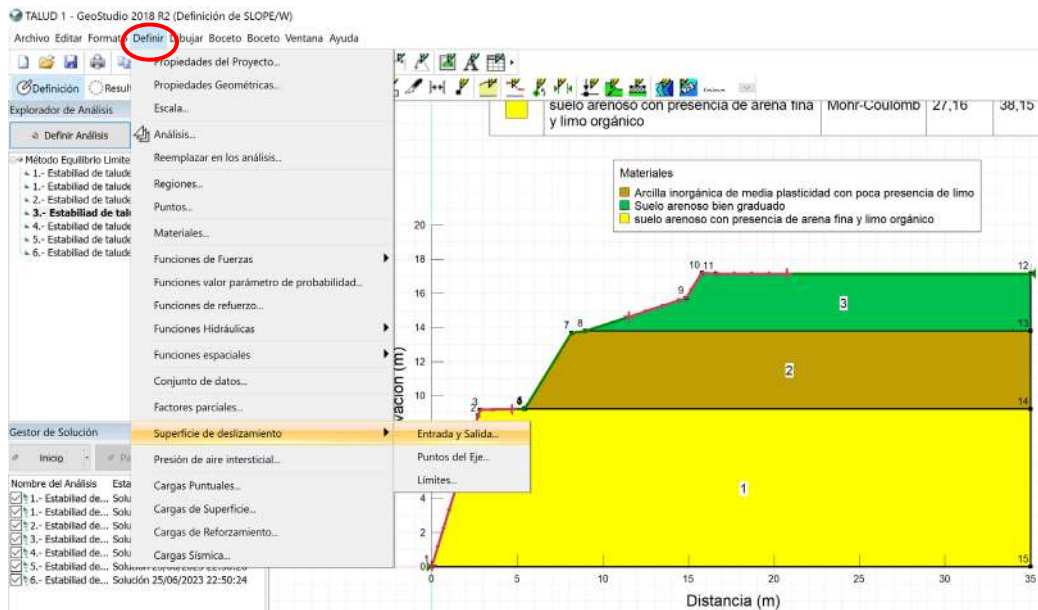
Figura 4.12. Adición de las características mecánicas en cada extracto



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Para introducir el tipo de análisis de falla, se debe entrar en la pestaña "definir" e introducir superficie de falla y elegimos el de entrada y salida.

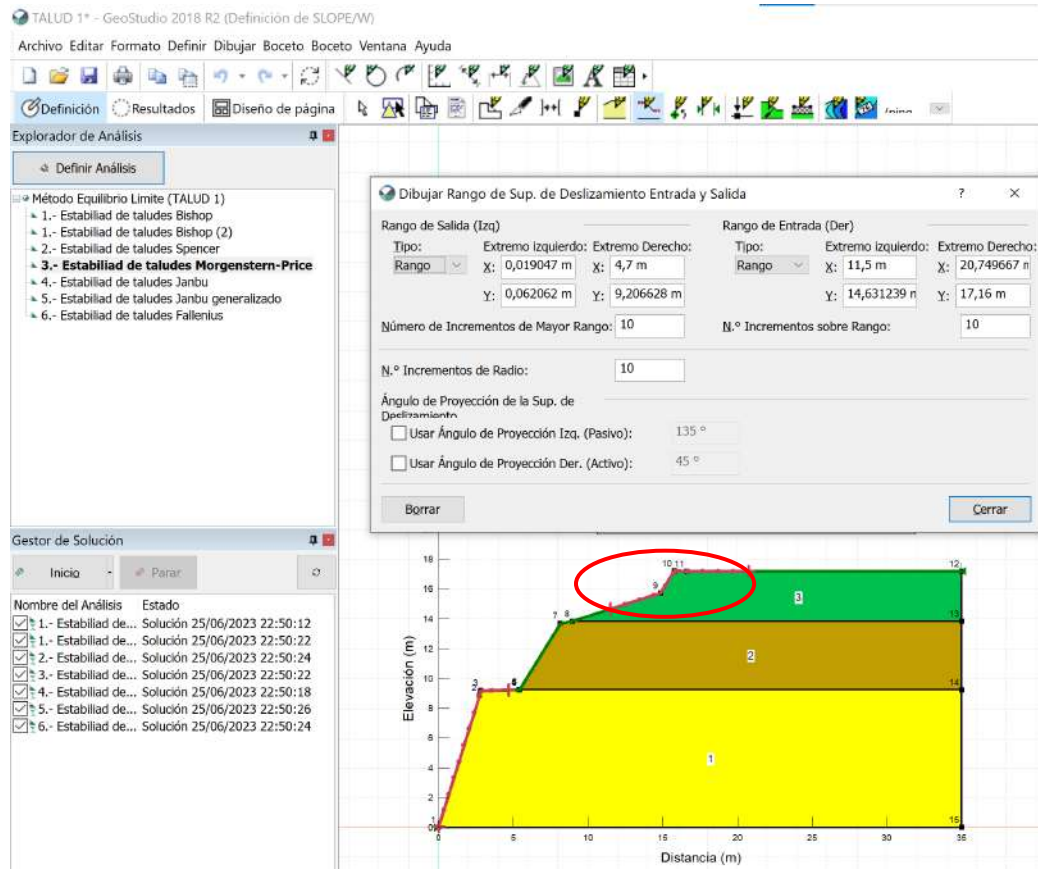
Figura 4.13. Selección de superficie de falla



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Automáticamente nos saldrá esta pantalla, las regiones de inicio y final de la superficie, se puede definir a través del comando definir, que define las coordenadas de borde de las regiones y el número de puntos de inicio y final, así como el número de superficies a generar para cada par de puntos.

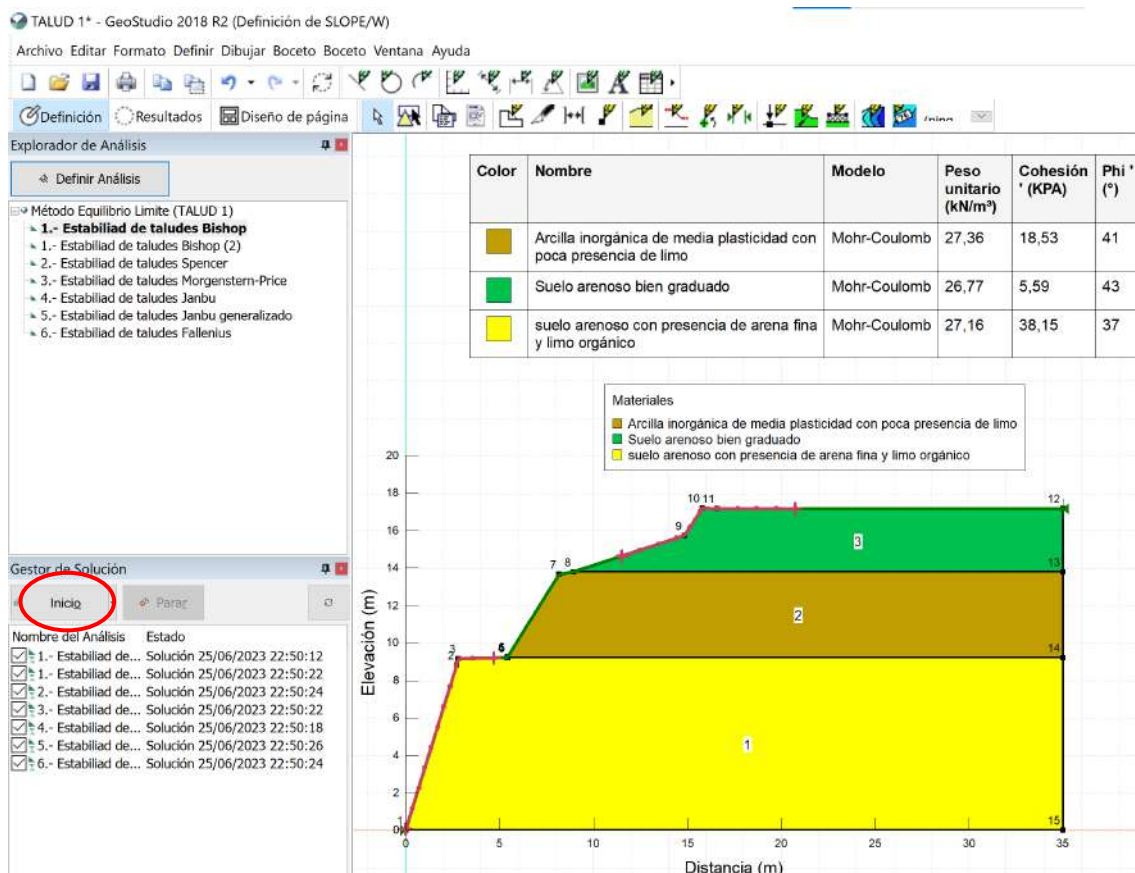
Figura 4.14. Faja de entrada y salida



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Teniendo todos los parámetros, condiciones de contorno y designados los materiales, procedemos a realizar el análisis, haciendo click en el icono "inicio" parte inferior izquierdo de la pantalla.

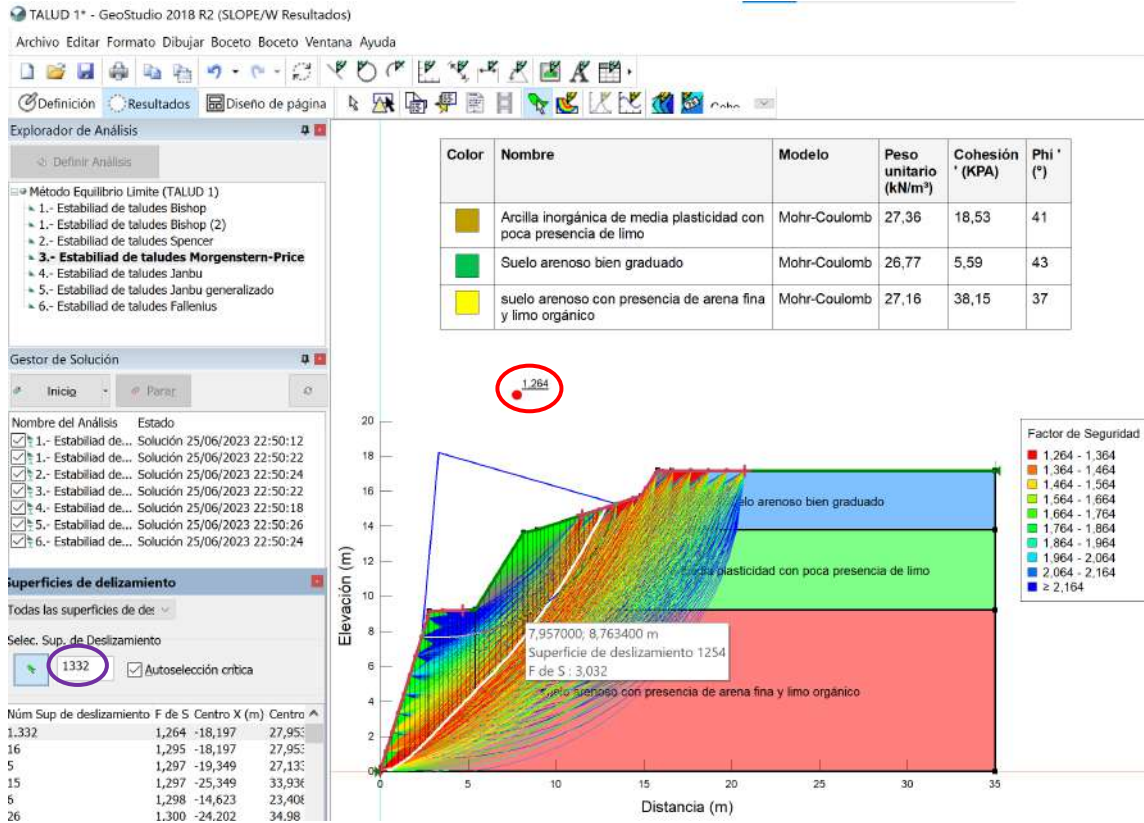
Figura 4.15. Inicio de análisis de cálculo



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

En esta pantalla, ya podemos observar el factor de seguridad crítico del talud, habiendo sido realizado por el método de entrada y salida. El análisis nos muestra un total de 1332 superficies de fallas y solo seleccionándola la más crítica, también nos muestra un recuadro con códigos de colores refiriéndose al factor de seguridad desde el más crítico hasta el más estable del talud y otro recuadro mostrando las características mecánicas de los extractos de suelos.

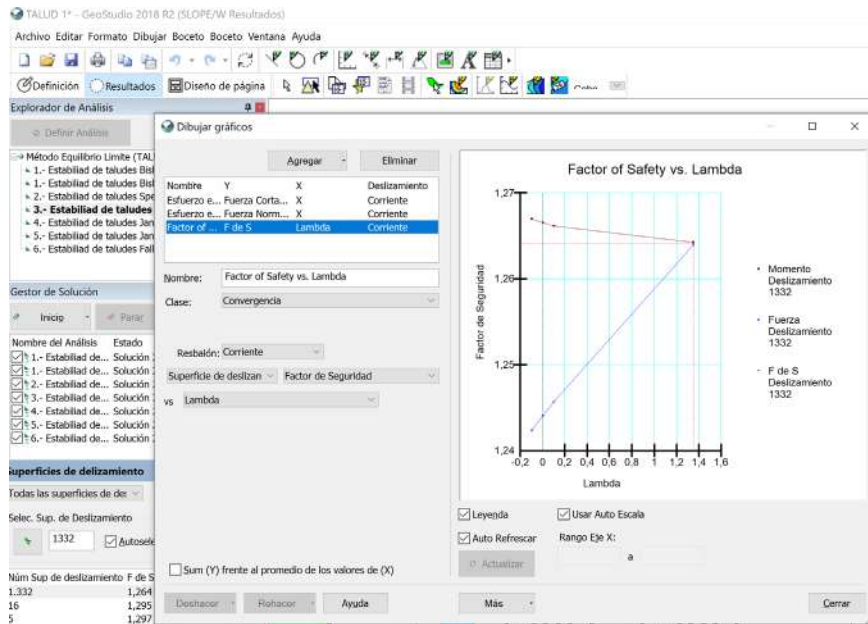
Figura 4.16. Factor de seguridad



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Entrando a la parte de los gráficos, podemos hacerlo haciendo click, en el icono de nombre "gráfico" posteriormente nos rebotará en pantalla con una nube de puntos que muestran las iteraciones tanto en equilibrios de fuerza y momentos.

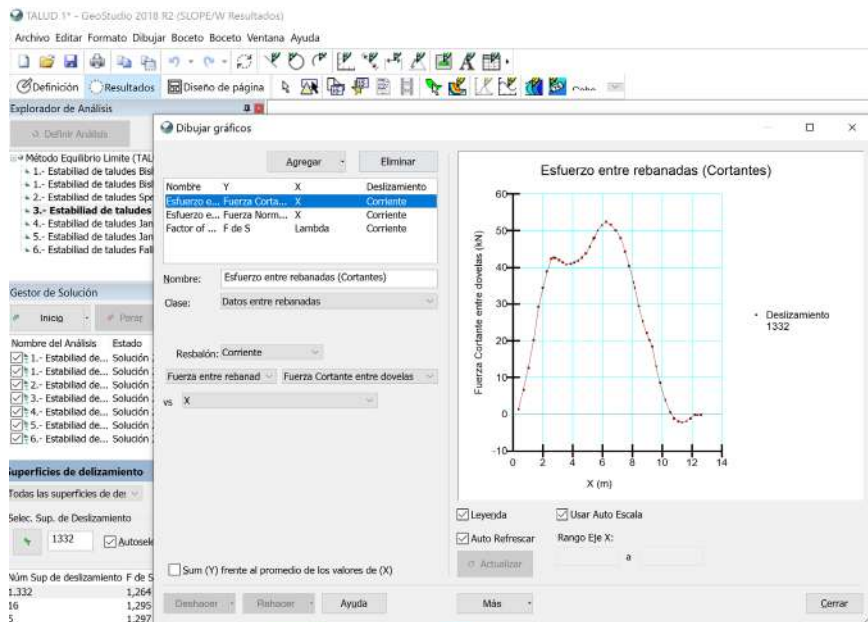
Figura 4.17. Factor de seguridad vs lambda



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Se crea o agrega una nueva gráfica denominada esfuerzos cortantes entre rebanadas, que son una nube de puntos con referencia de coordenadas X y Y, generados en toda la superficie de falla.

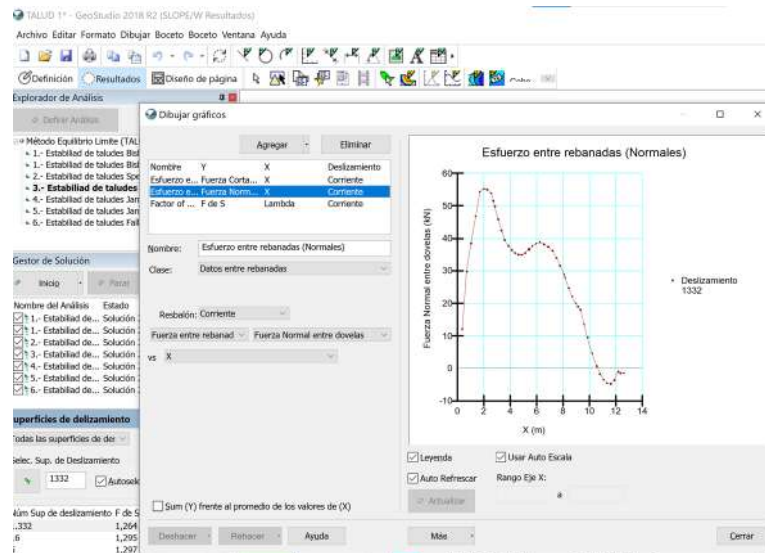
Figura 4.18. Esfuerzos cortantes



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

De igual manera se crea una gráfica denominada, esfuerzos normales entre rebanadas, netamente para representar e identificar los puntos de esfuerzo normales actuante en toda la superficie de falla.

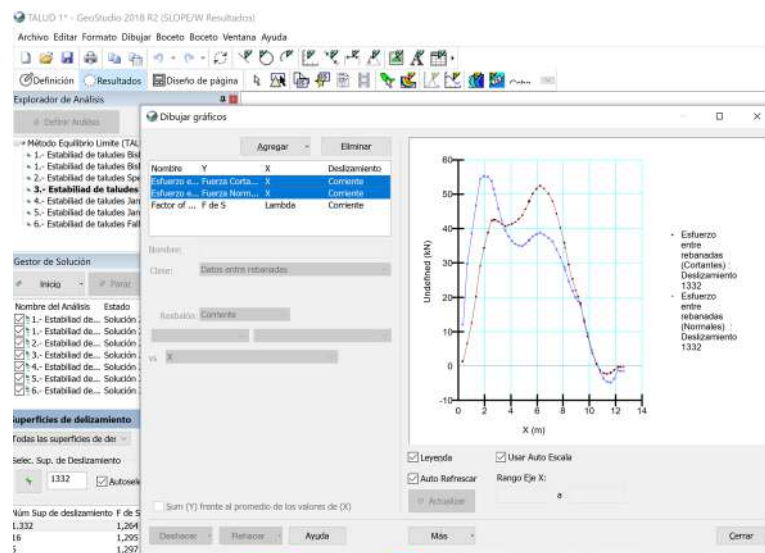
Figura 4.19. Esfuerzos normales



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

También se los puede graficar de manera conjunta tanto los esfuerzos cortantes y los esfuerzos normales.

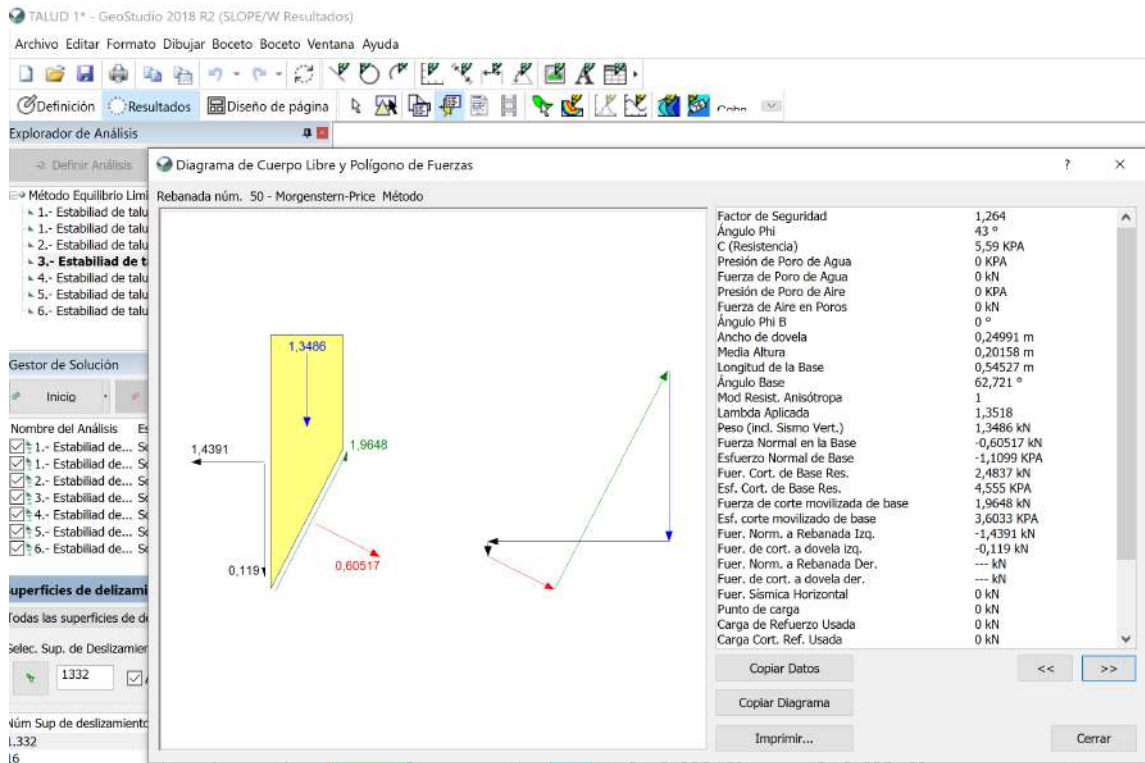
Figura 4.20. Esfuerzos mixtos



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Para poder observar el comportamiento es decir ver los esfuerzos actuantes entre cada rebanada o dovela lo cual es importante ver y conocer esos valores, como también nos muestra una tabla de datos en lado derecho indicando todos sus parámetros de la rebanada seleccionada.

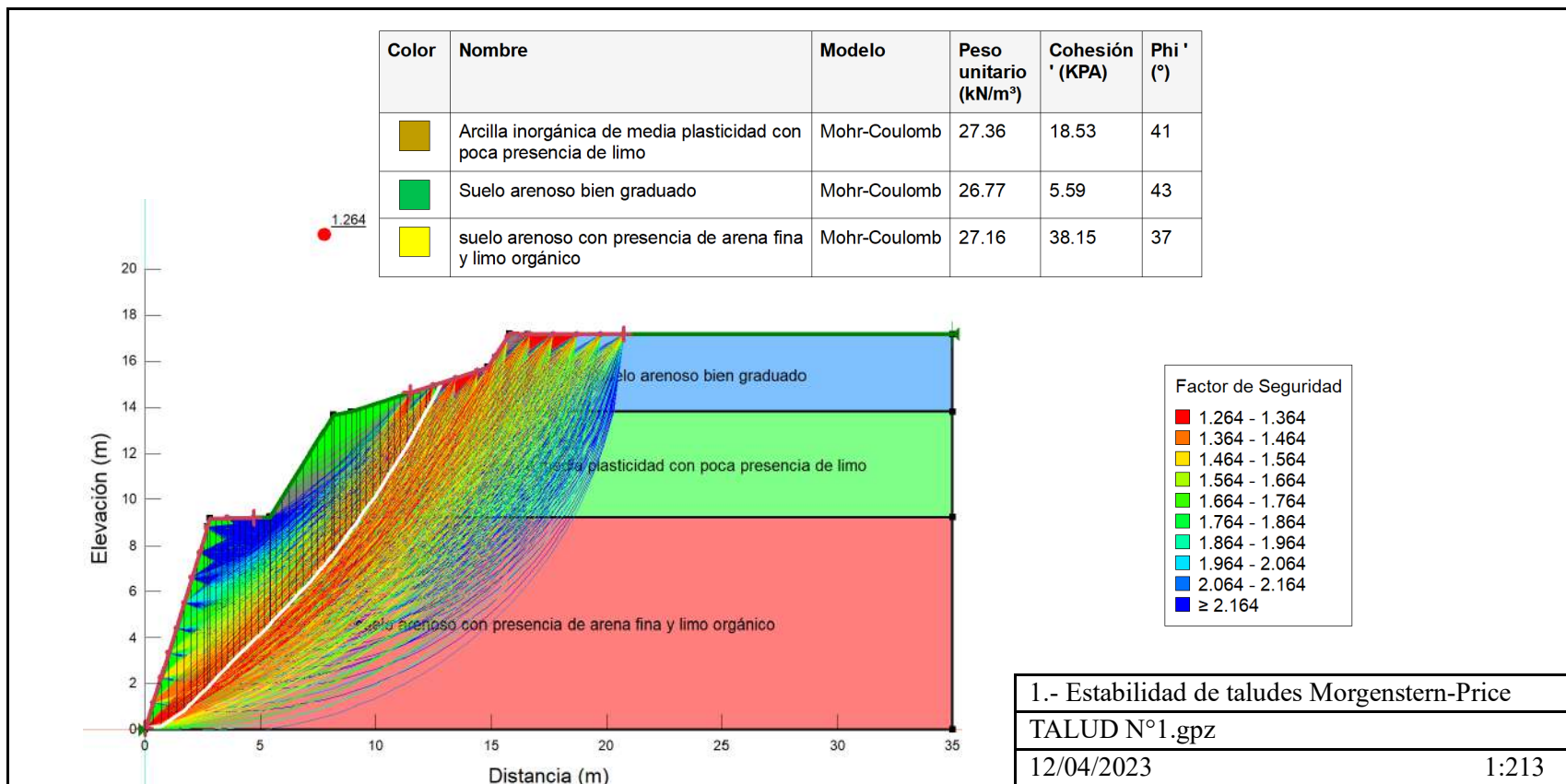
Figura 4.21. Diagrama de cuerpo libre (rebanada)



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

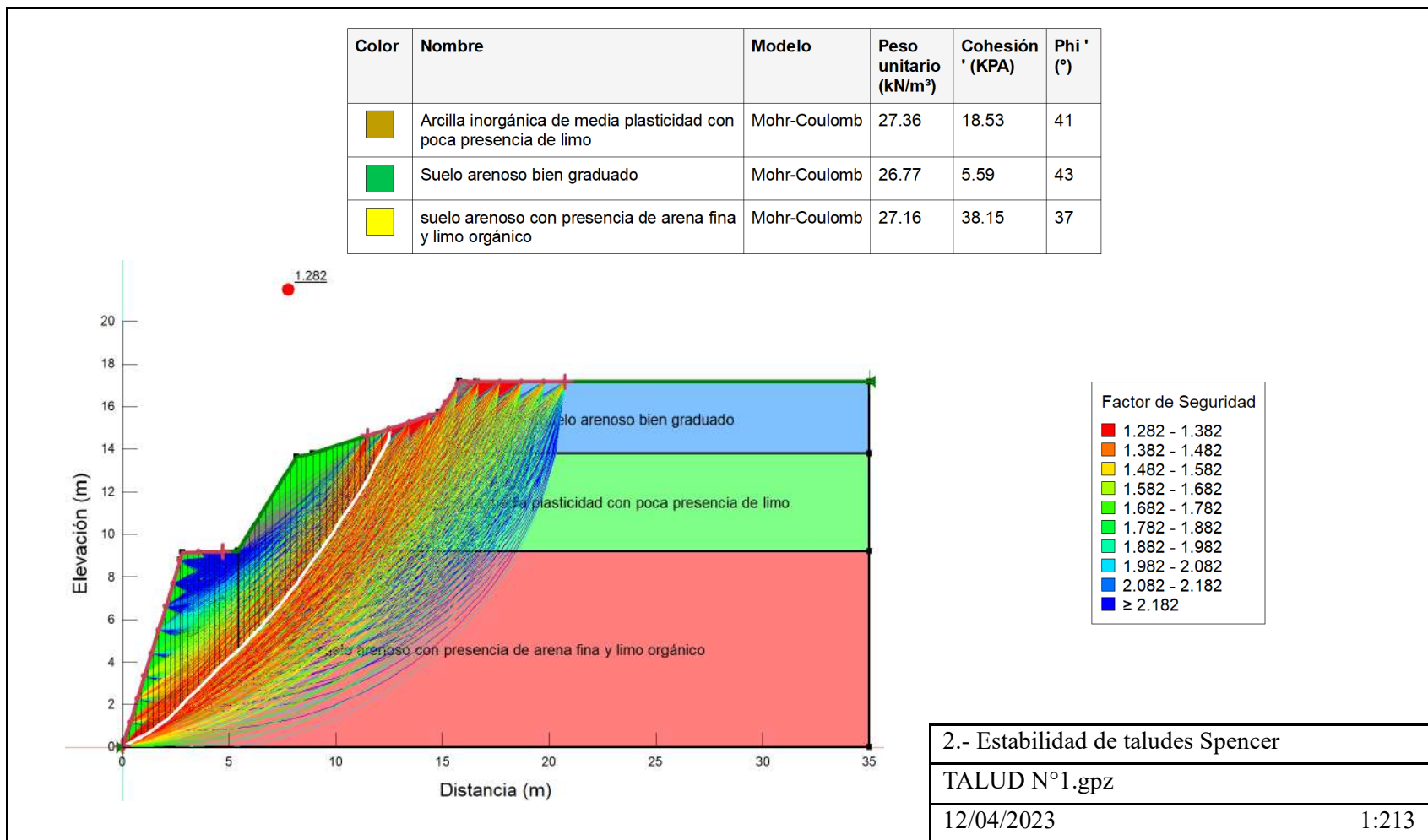
4.3. Análisis de estabilidad de taludes por diferentes métodos aplicando el programa Geo/Slope (Talud N°1)

Figura 4.22. Estabilidad de talud N°1 método Morgenstern-Price



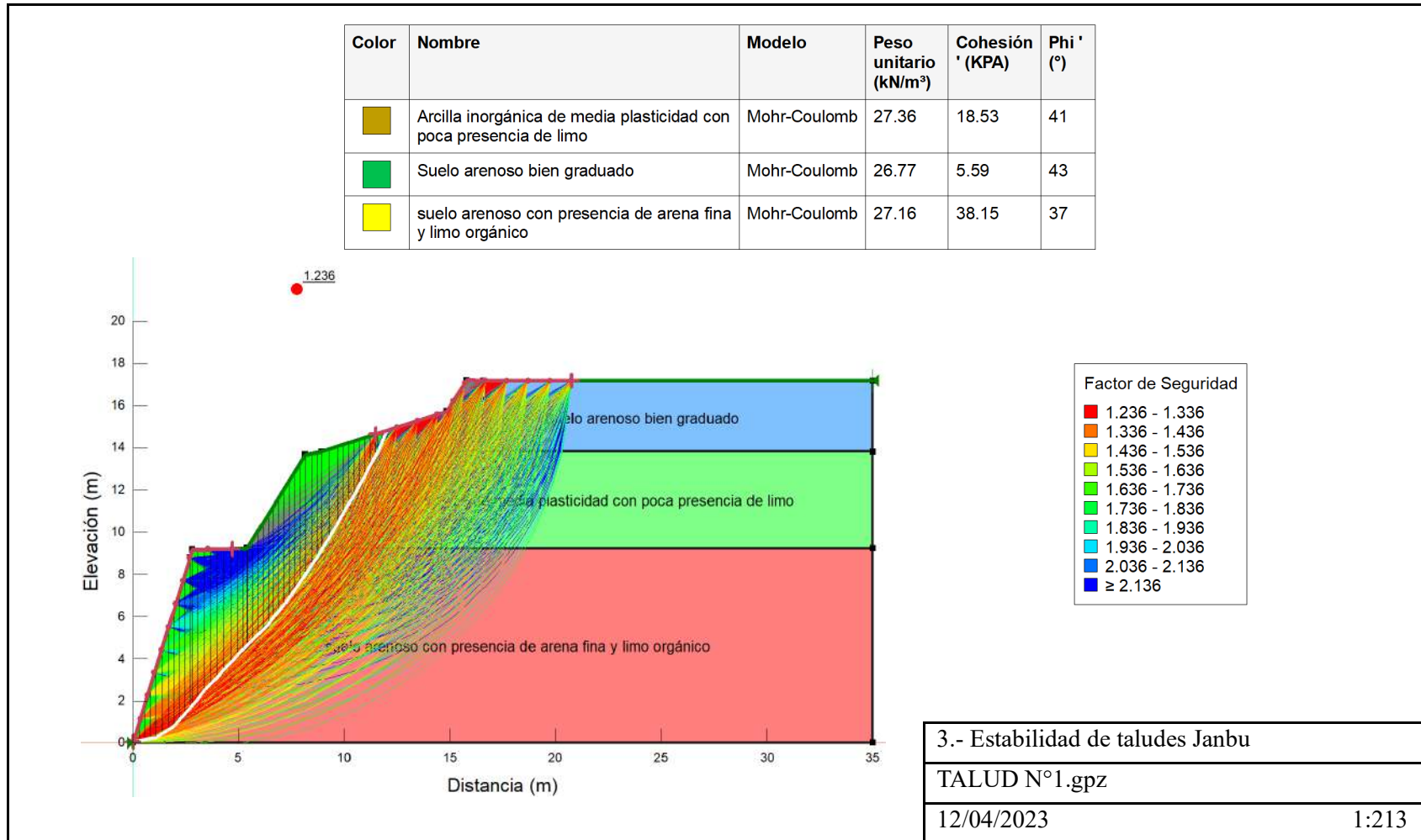
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.23. Estabilidad de talud N°1 método Spencer



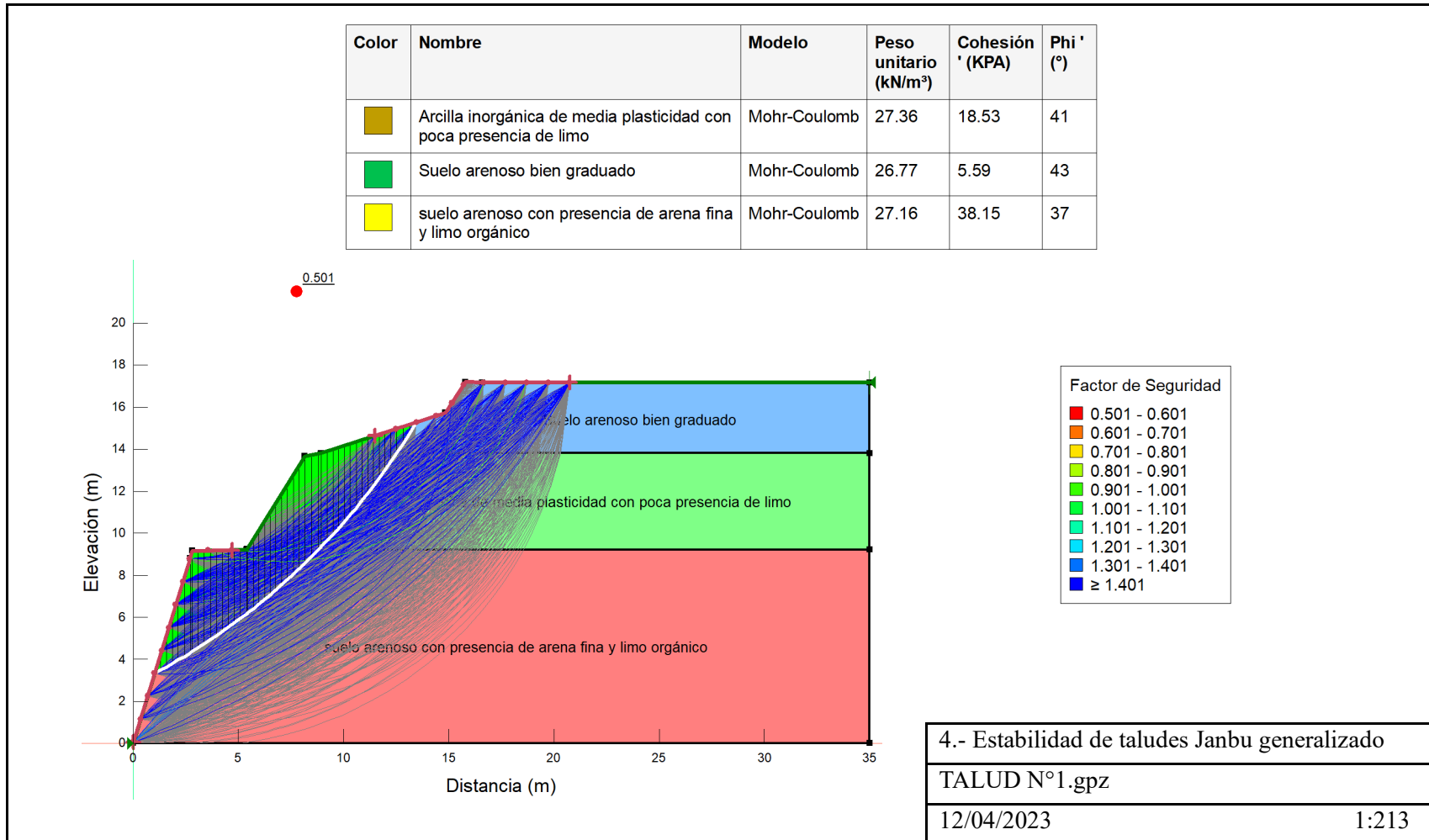
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.24. Estabilidad de talud N°1 Janbu



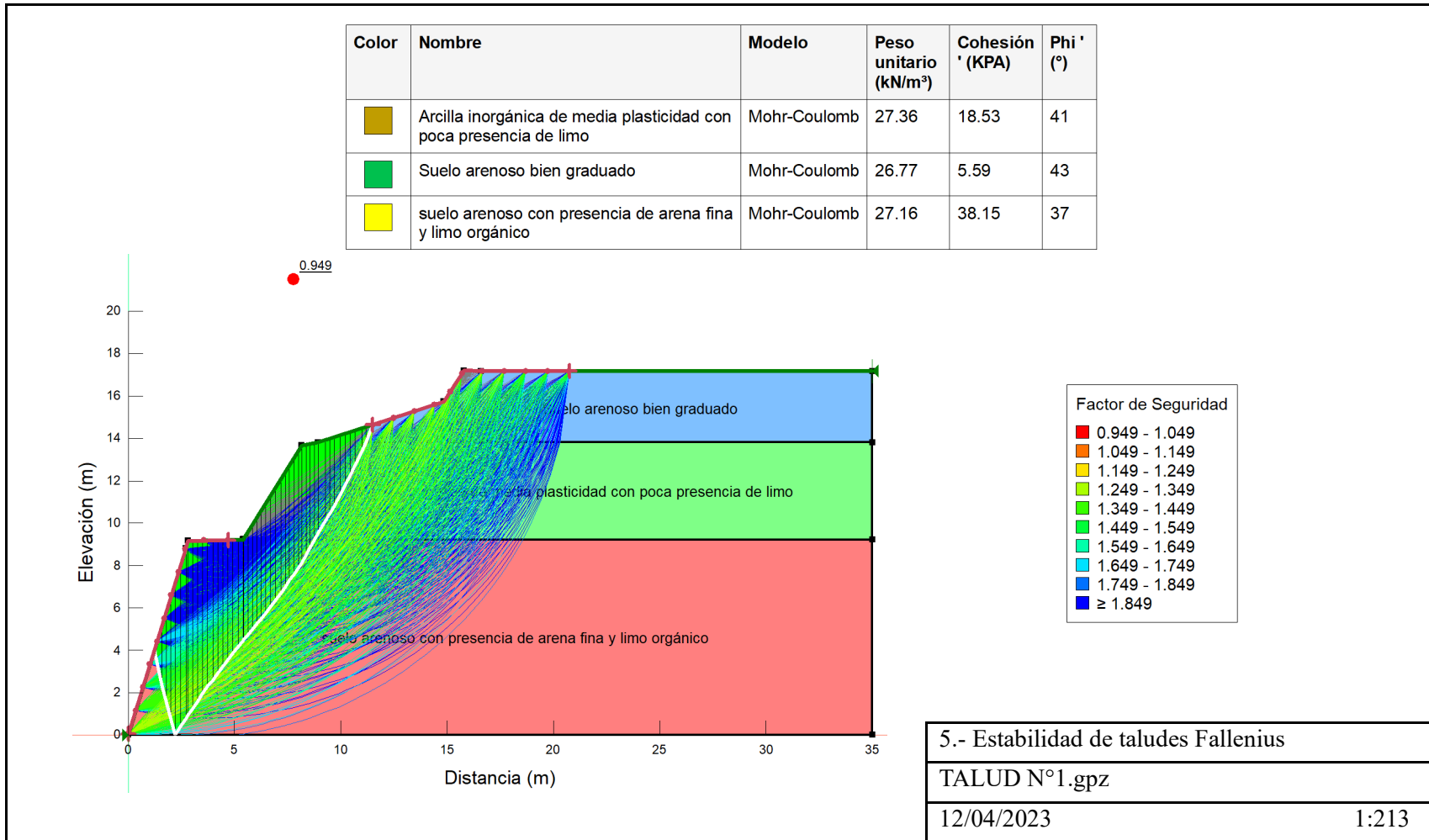
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.25. Estabilidad de talud N°1 método Janbu generalizado



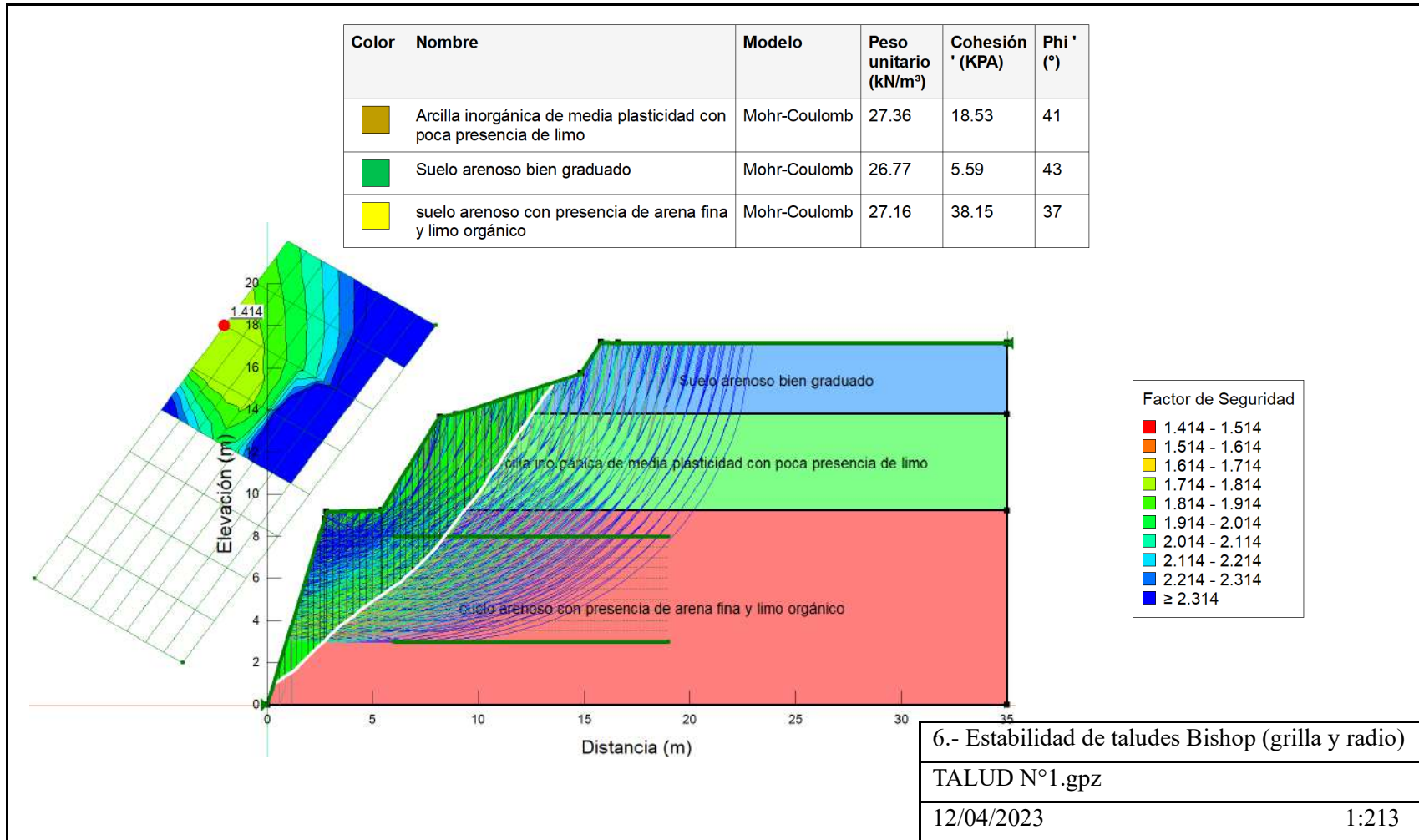
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.26. Estabilidad de talud N°1 método Fallenius



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.27. Estabilidad de talud N°1 método Bishop sup. de falla (grilla y radio)



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

4.4. Análisis de estabilidad de taludes por diferentes métodos aplicando el programa Geo/Slope (Talud N°2)

Tabla 4.13. Puntos exportados de civil 3D para graficar en Geo/Slope (Talud N°2)

Punto	Progresiva (m)	Elevación (m)
1	0,00	0,00
2	0,91	1,84
3	1,11	2,53
4	4,05	9,45
5	4,47	10,28
6	6,76	11,97
7	7,12	12,65
8	8,51	13,67
9	14,14	13,16
10	18,33	11,04
11	22,88	9,44
12	25,50	9,39
13	29,10	10,73
14	30,31	10,60
15	31,48	10,34
16	34,55	9,05
17	40,00	9,05
18	40,00	0,00
19	0,00	0,00

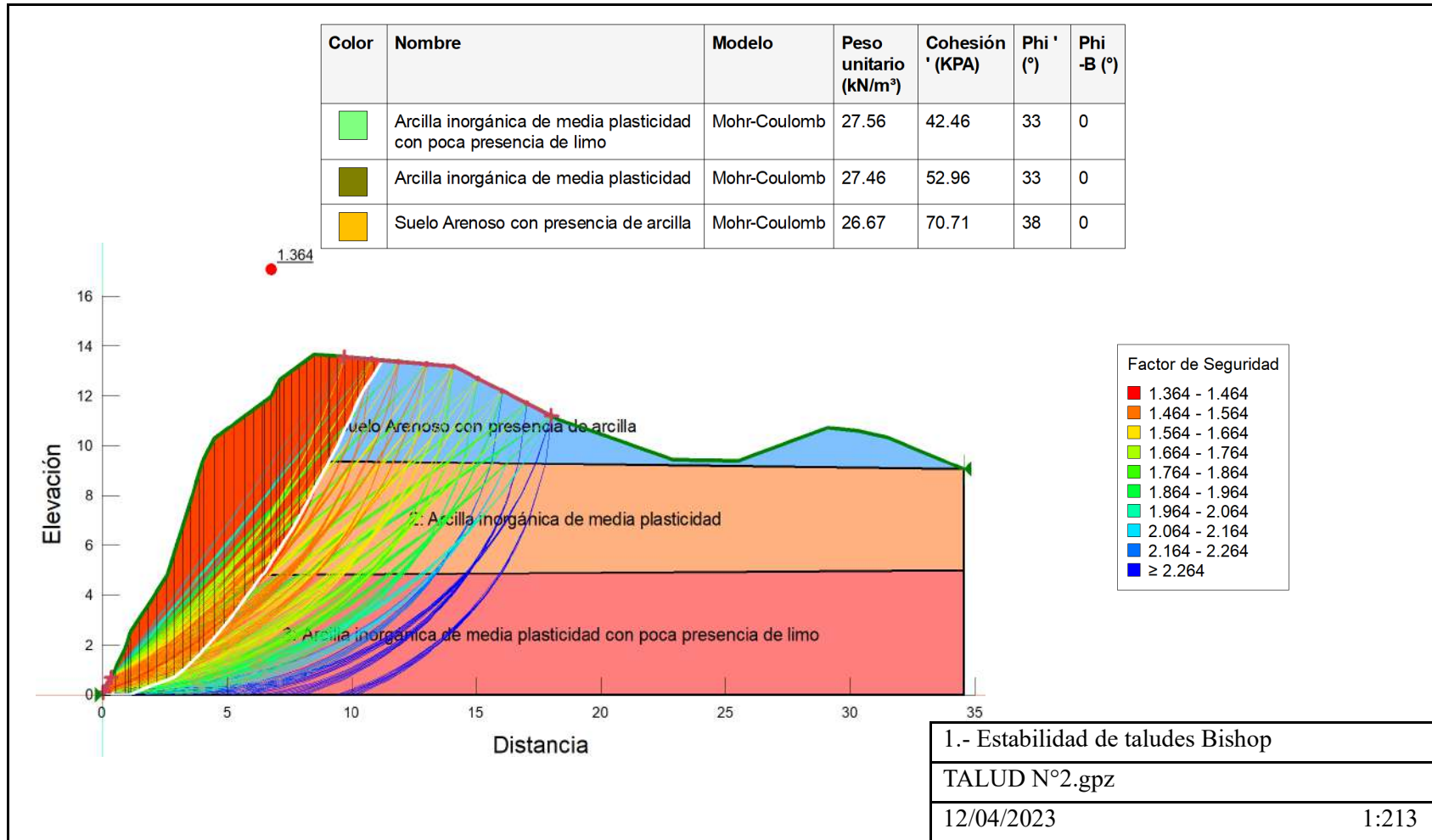
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.14. Características mecánicas del suelo (Talud N°2)

Talud N°2	Pie	2,81	27,56	0,43	42,46	33,00
	Cuerpo	2,80	27,46	0,54	52,96	33,00
	Corona	2,72	26,67	0,72	70,71	38,00

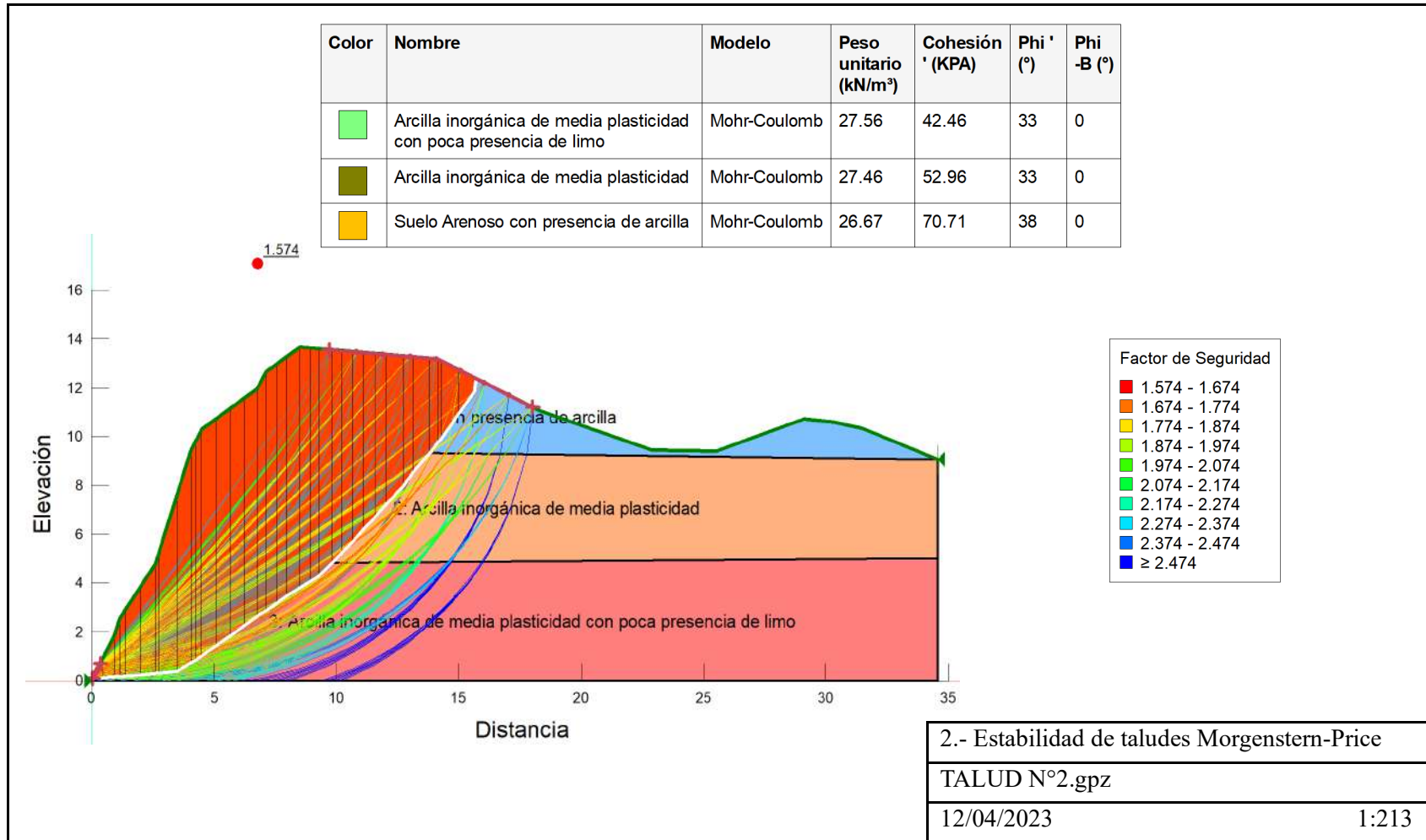
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.28. Estabilidad de talud N°2 método Bishop



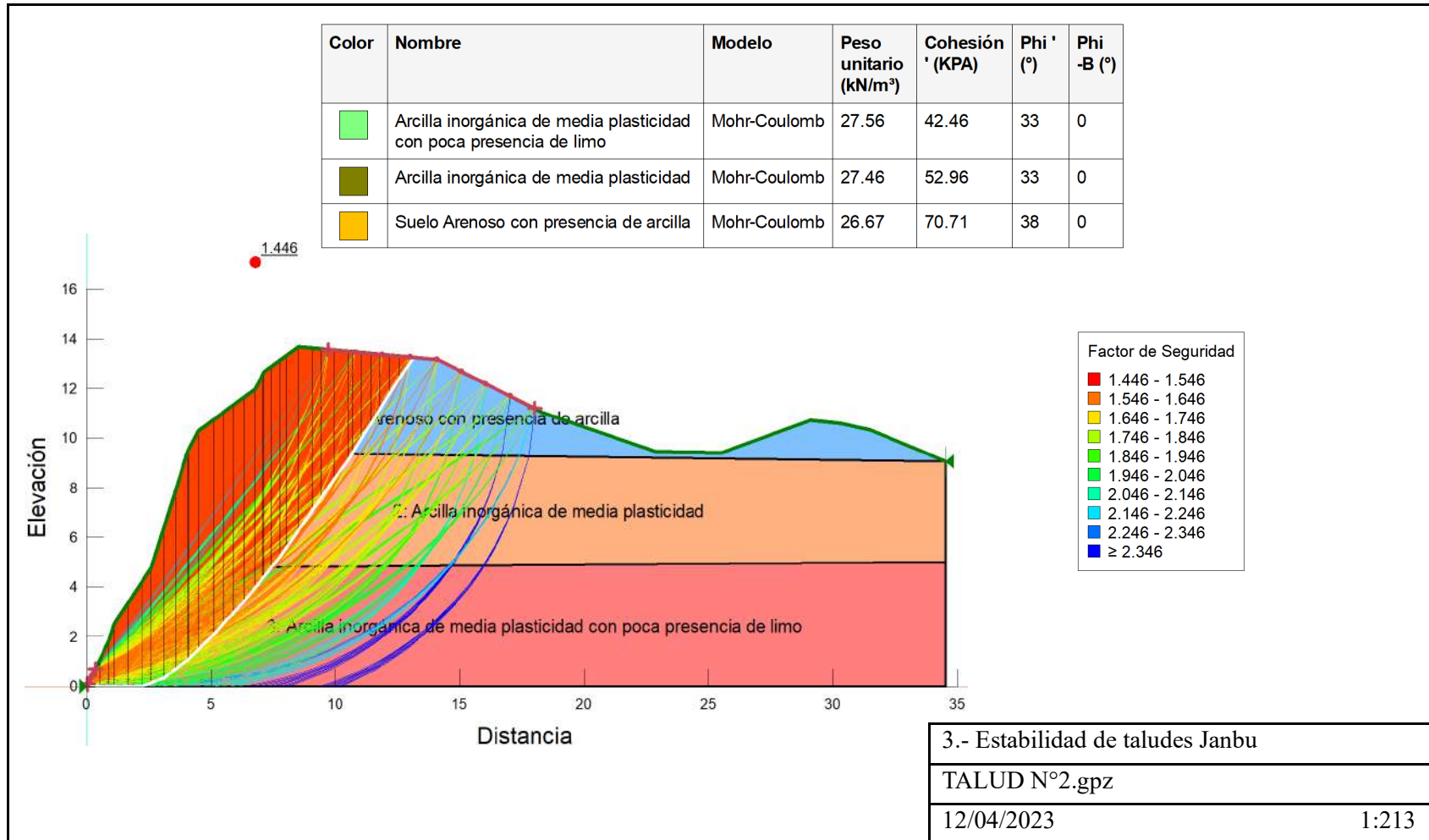
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.29. Estabilidad de talud N°2 método Morgenstern-Price



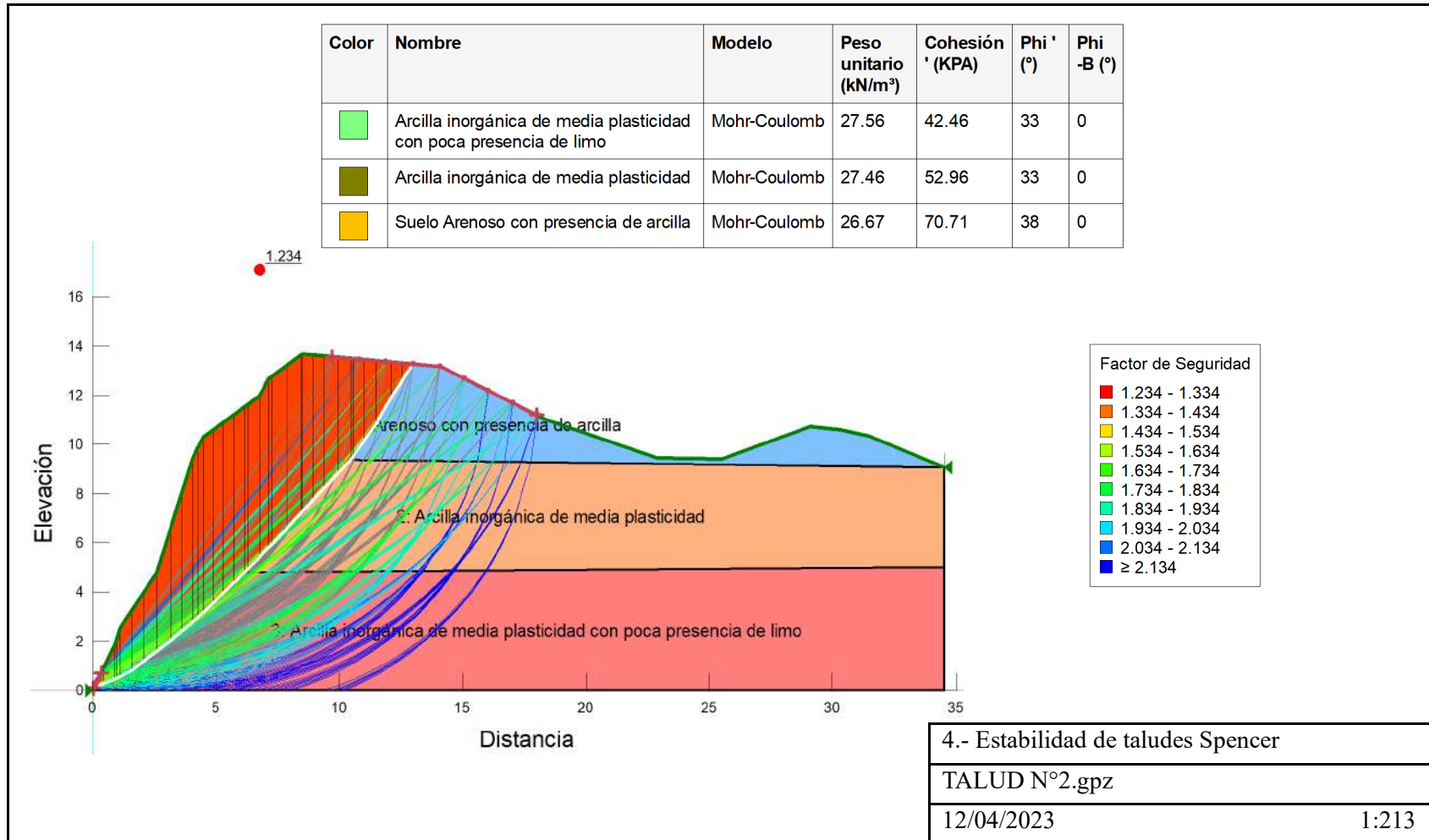
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.30. Estabilidad de talud N°2 método Janbu



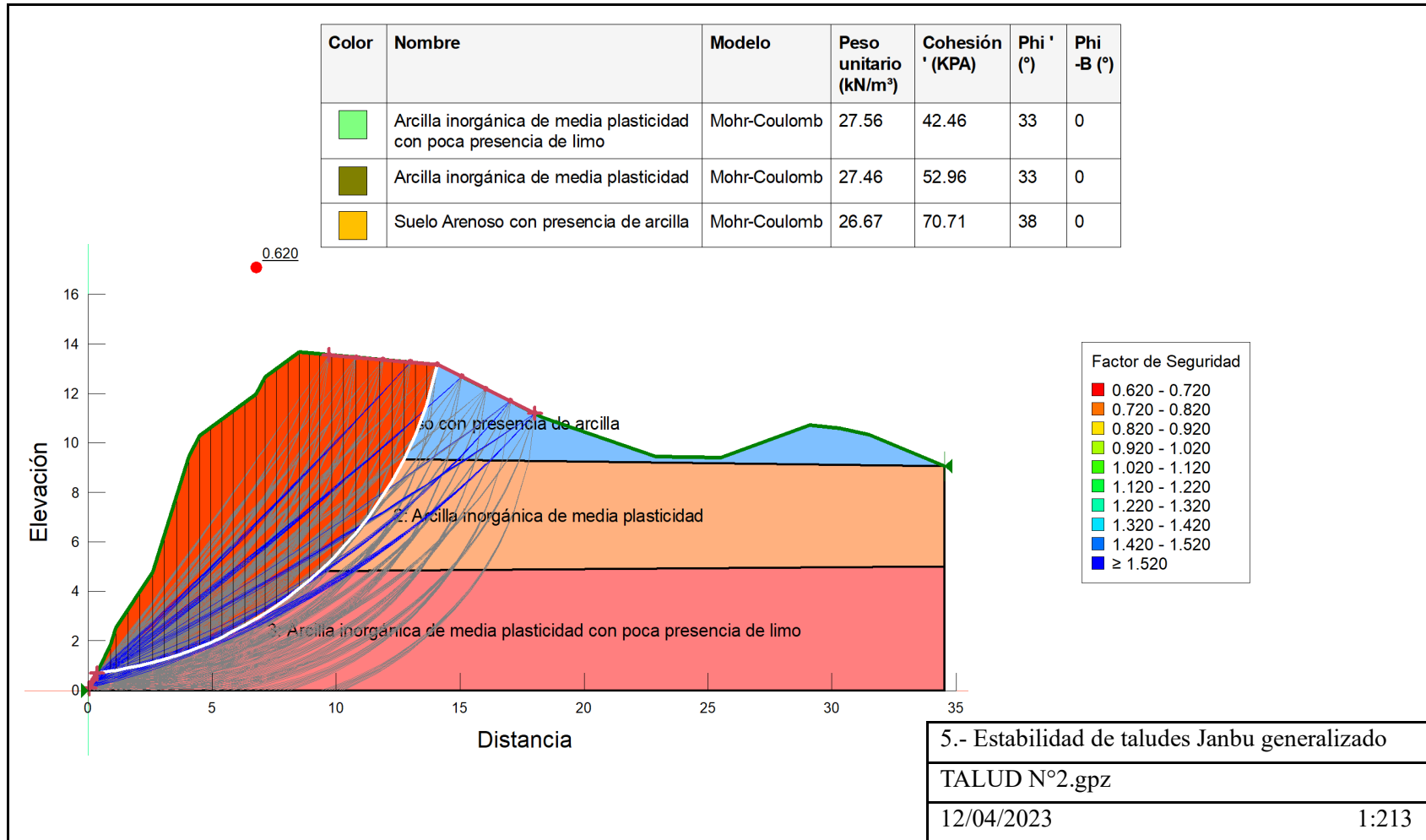
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.31. Estabilidad de talud N°2 método Spencer



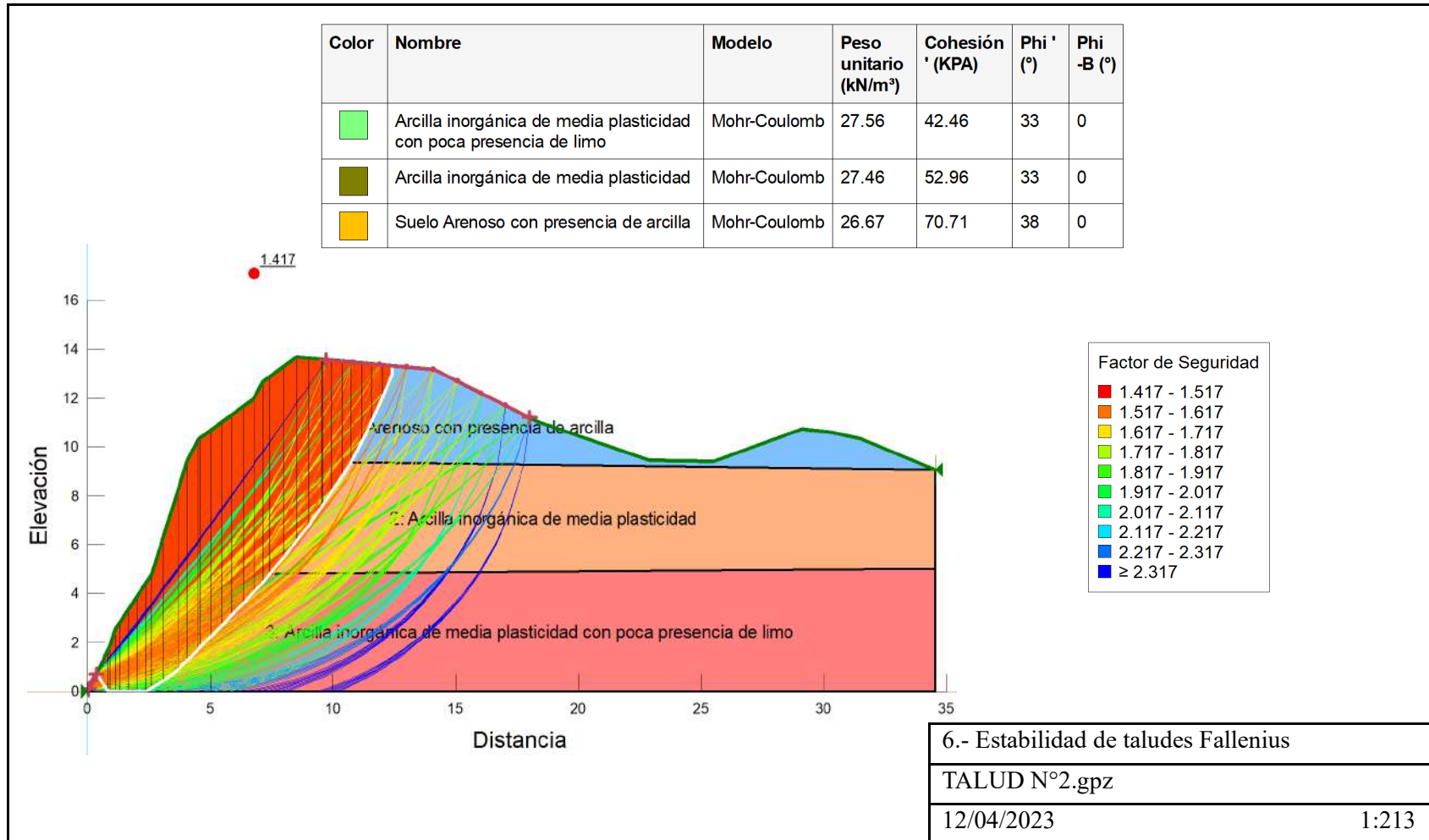
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.32. Estabilidad de talud N°2 método Janbu generalizado



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.33. Estabilidad de talud N°2 método Fallenius



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

4.5. Análisis de estabilidad de taludes por diferentes métodos aplicando el programa Geo/Slope (Talud N°3)

Tabla 4.15. Puntos exportados de civil 3D para graficar en Geo/Slope (Talud N°3)

Punto	Progresiva (m)	Elevación (m)
1	0,00	0,00
2	2,05	4,09
3	3,03	6,42
4	3,59	8,46
5	7,33	8,46
6	8,48	9,17
7	9,59	11,27
8	10,70	13,38
9	11,41	14,72
10	12,22	15,34
11	15,71	15,99
12	16,56	17,84
13	17,21	18,81
14	17,63	19,42
15	18,62	19,59
16	22,66	20,26
17	25,35	19,78
18	27,31	20,14
19	34,94	19,88
20	41,57	21,73
21	45,24	22,18
22	53,04	24,76
23	54,28	24,93
24	58,59	25,33
25	65,00	25,33
26	65,00	0,00
27	0,00	0,00

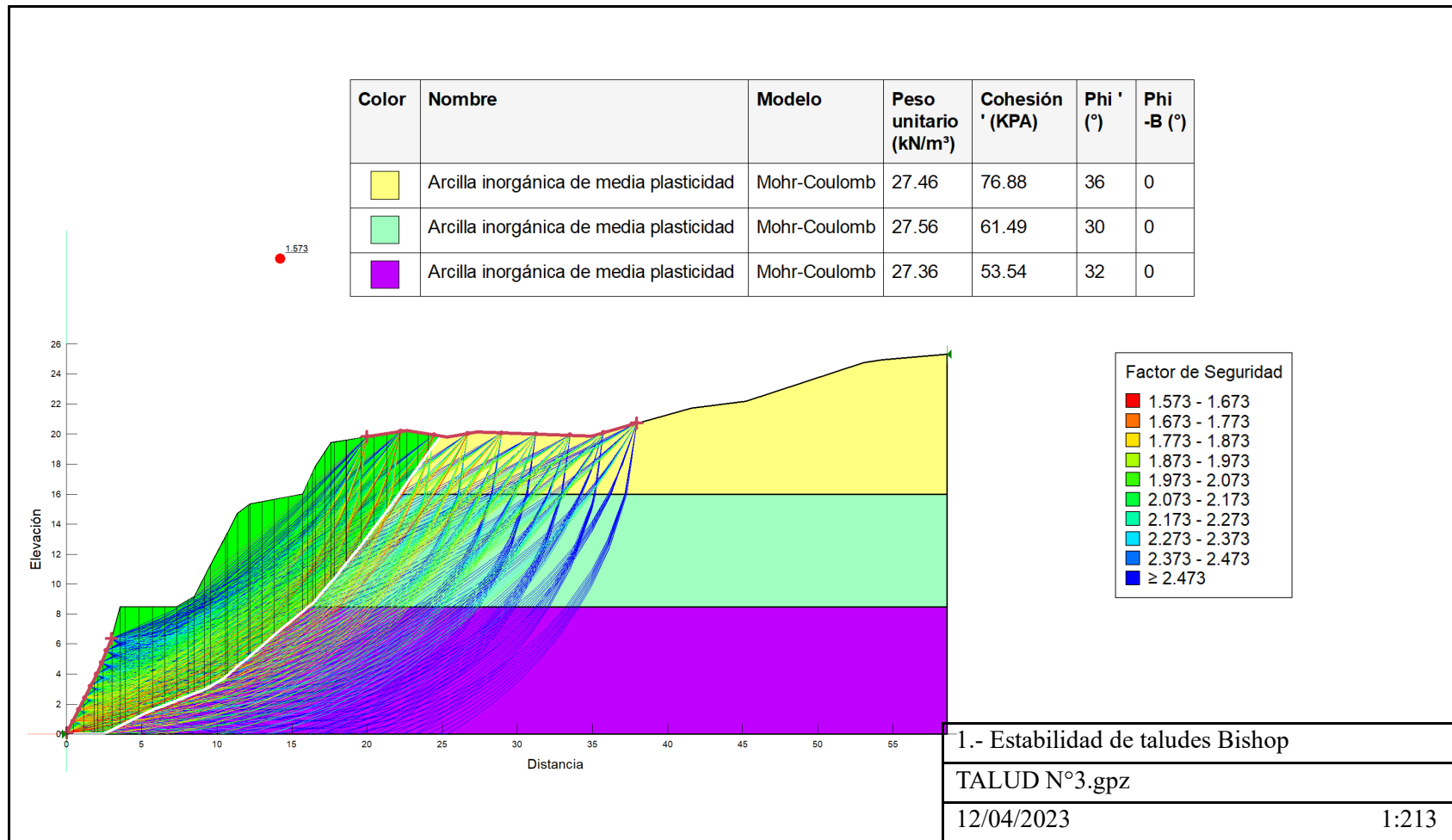
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.16. Características mecánicas del suelo (Talud N°3)

Talud N°3	Pie	2,79	27,36	0,55	53,54	32,00
	Cuerpo	2,81	27,56	0,63	61,49	30,00
	Corona	2,80	27,46	0,78	76,88	36,00

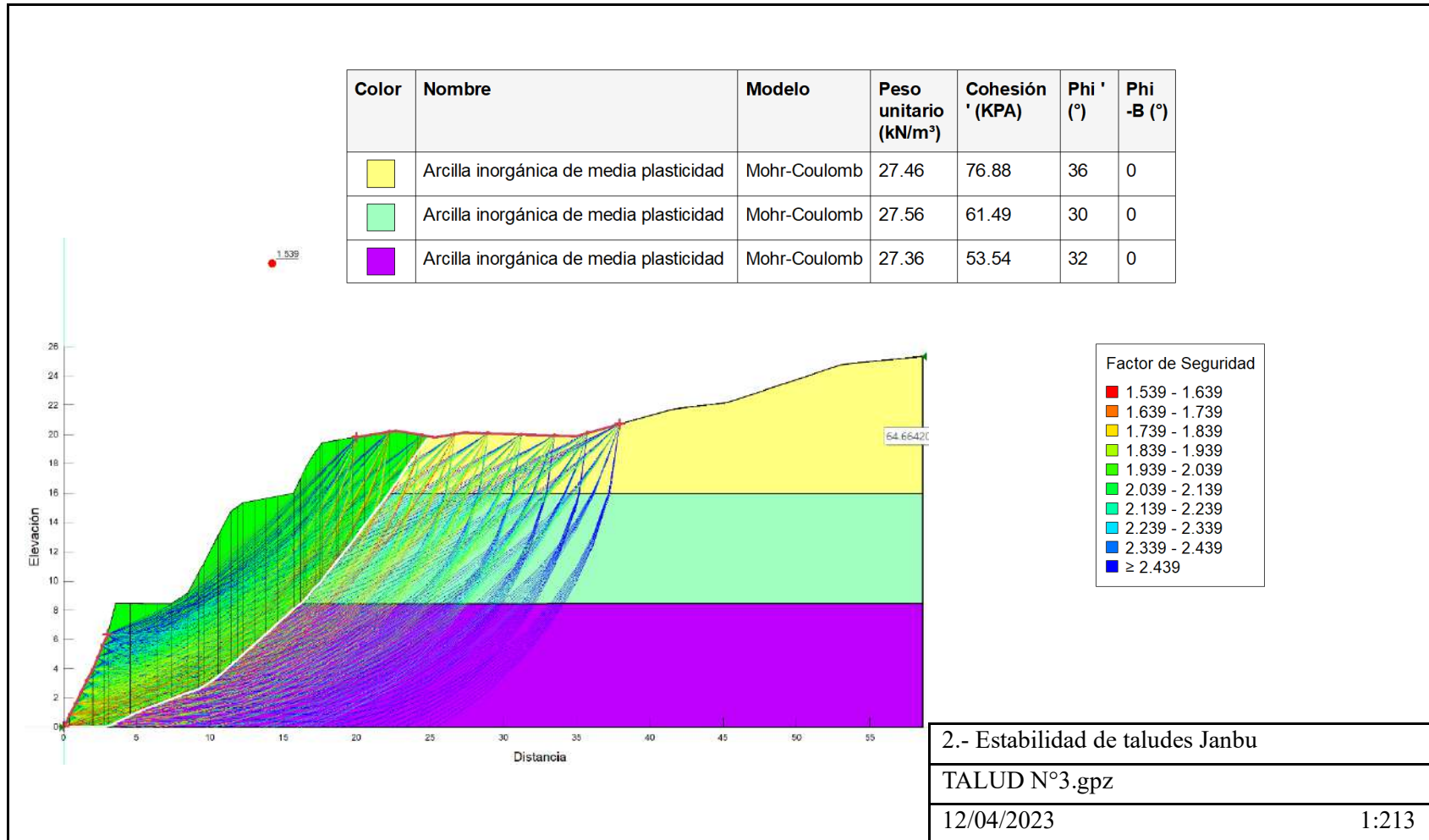
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.34. Estabilidad de talud N°3 método Bishop



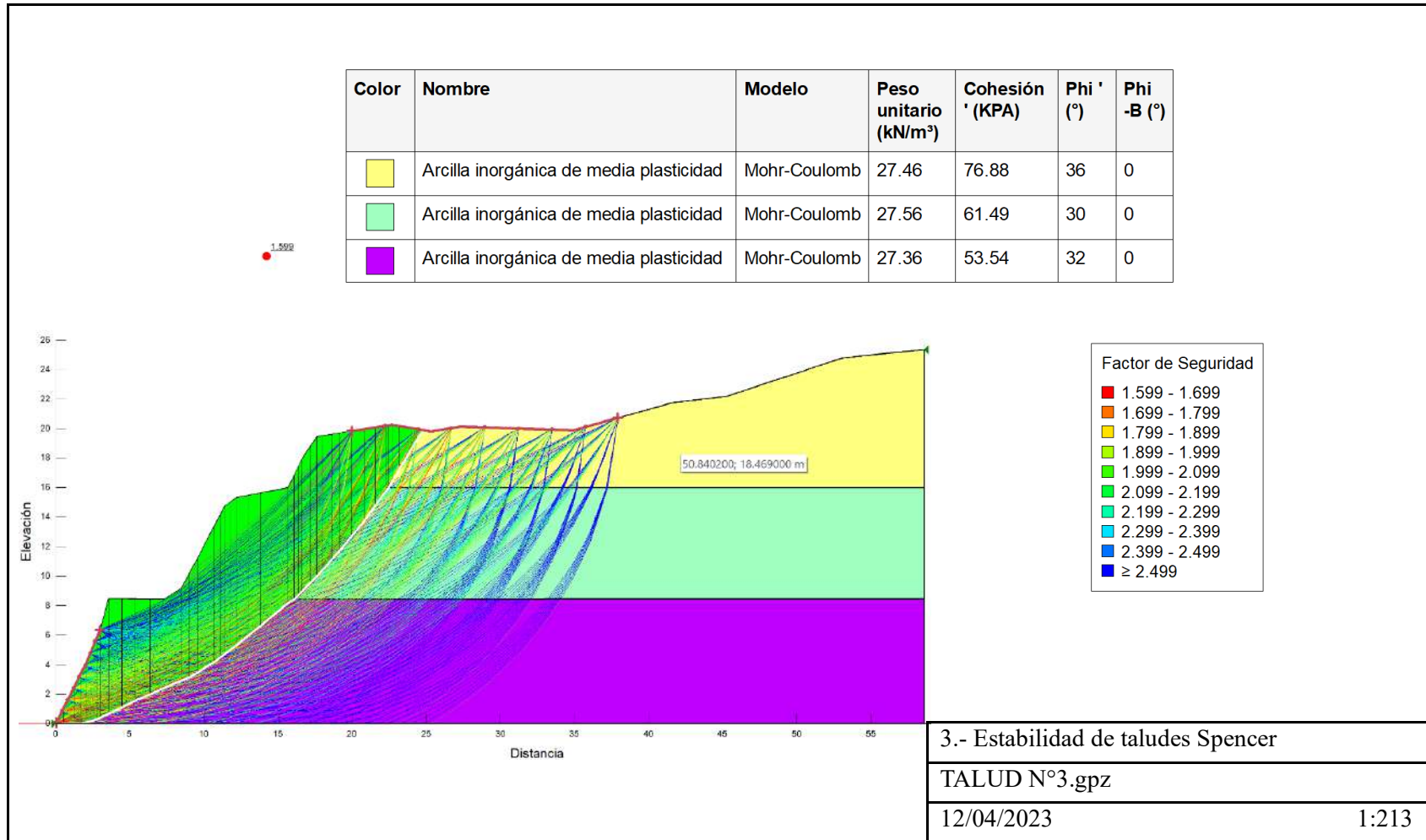
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.35. Estabilidad de talud N°3 método Janbu



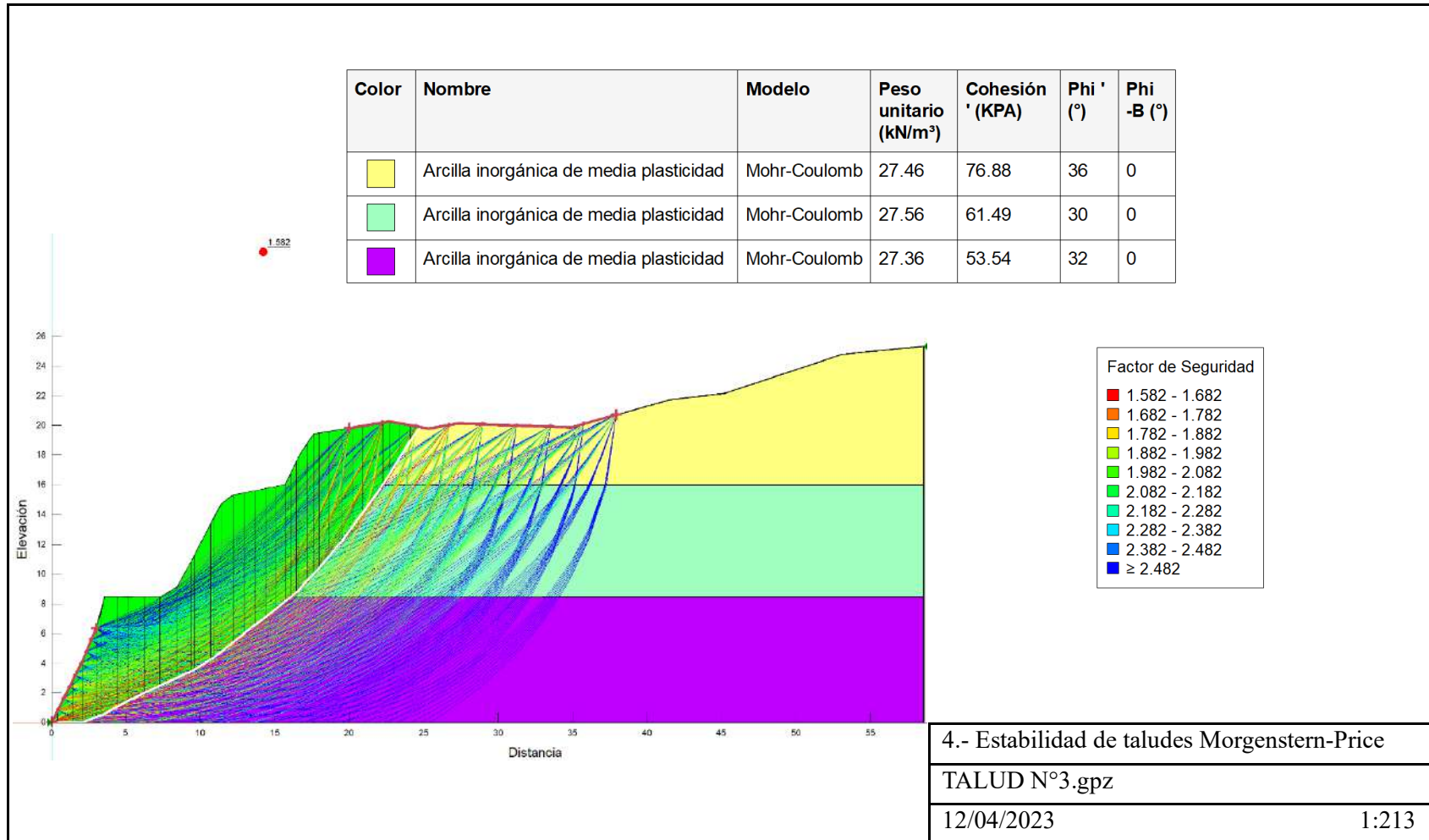
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.36. Estabilidad de talud N°3 método Spencer



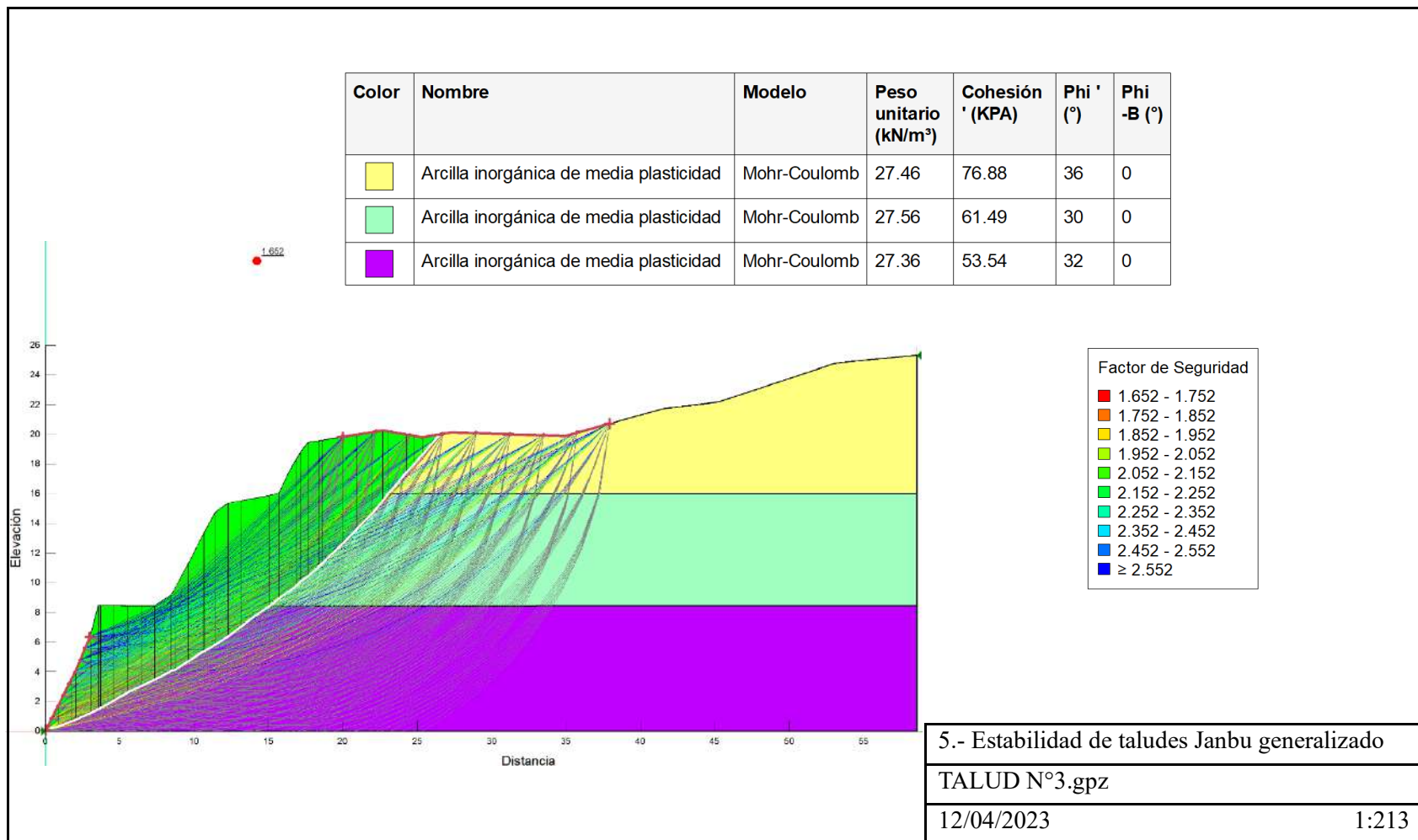
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.37. Estabilidad de talud N°3 método Morgenstern-Price



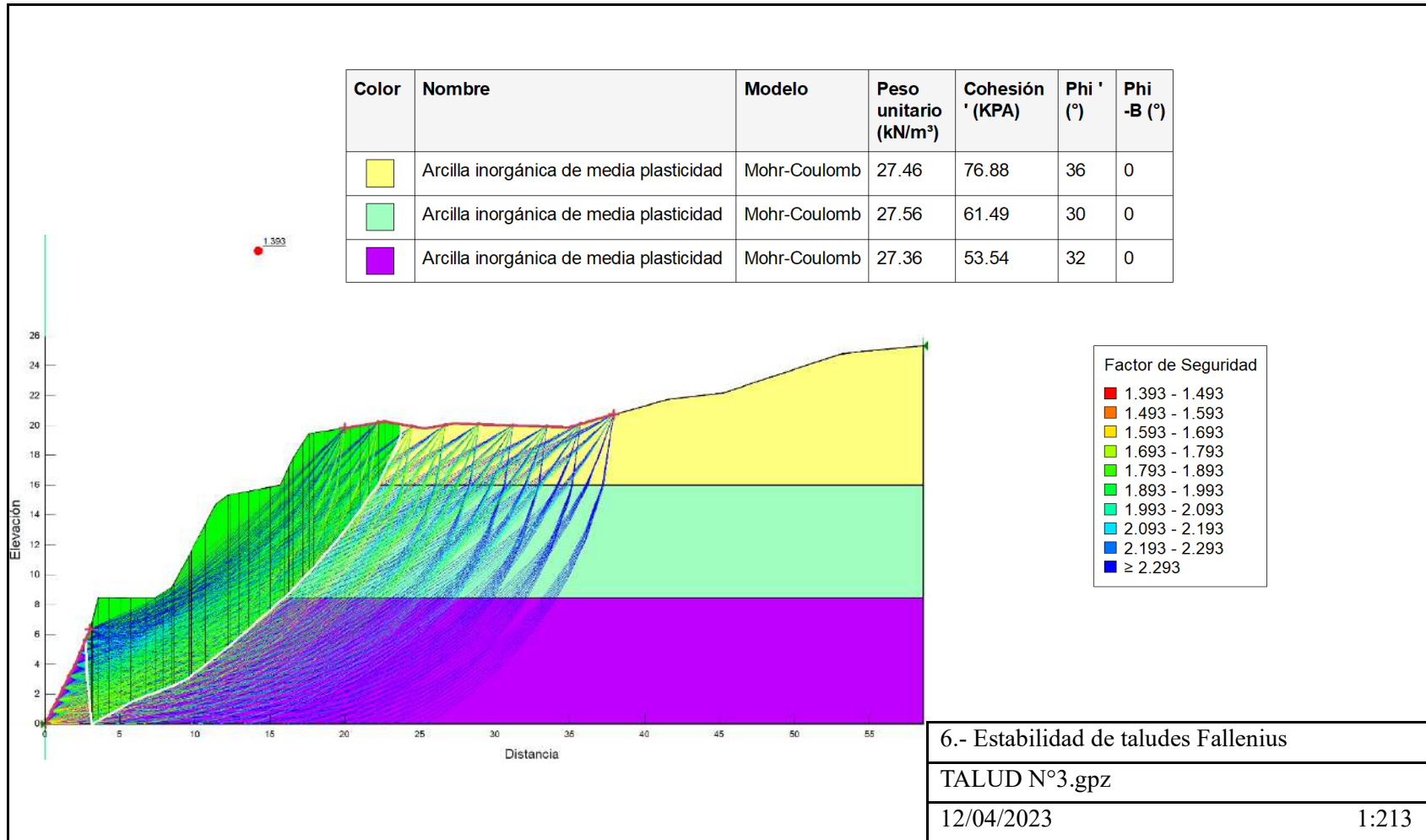
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.38. Estabilidad de talud N°3 método Janbu generalizado



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.39. Estabilidad de talud N°3 método Fallenius



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

4.6. Análisis de estabilidad de taludes por diferentes métodos aplicando el programa Geo/Slope (Talud N°4)

Tabla 4.17. Puntos exportados de civil 3D para graficar en Geo/Slope (Talud N°4)

punto	Progresiva (m)	Elevación (m)
1	0,00	0,00
2	1,37	1,41
3	1,57	2,01
4	1,74	2,48
5	2,04	4,12
6	2,36	4,90
7	3,80	10,09
8	3,87	10,33
9	3,94	10,45
10	5,68	11,55
11	6,52	11,16
12	16,61	15,31
13	18,80	16,05
14	19,15	16,18
15	19,34	16,24
16	25,00	16,24
17	25,00	0,00
18	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

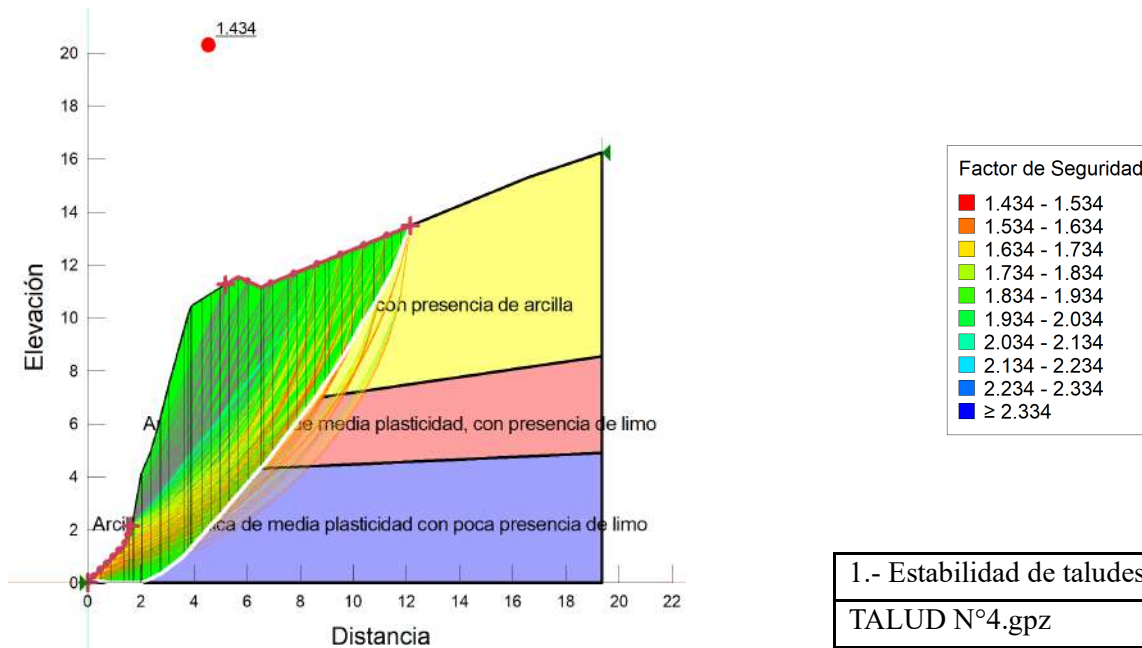
Tabla 4.18. Características mecánicas del suelo (Talud N°4)

Talud N°4	Pie	2,83	27,75	0,67	65,80	24,00
	Cuerpo	2,84	27,85	0,90	88,55	31,00
	Corona	2,75	26,97	0,43	42,46	40,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.40. Estabilidad de talud N°4 método Bishop

Color	Nombre	Modelo	Peso unitario (kN/m³)	Cohesión ' (KPA)	Phi ' (°)	Phi -B (°)
■	Arcilla inorgánica de media plasticidad con poca presencia de limo	Mohr-Coulomb	27.75	65.8	24	0
■	Arcilla inorgánica de media plasticidad, con presencia de limo	Mohr-Coulomb	27.85	88.55	31	0
■	Suelo Arenoso con presencia de arcilla	Mohr-Coulomb	26.97	42.46	40	0

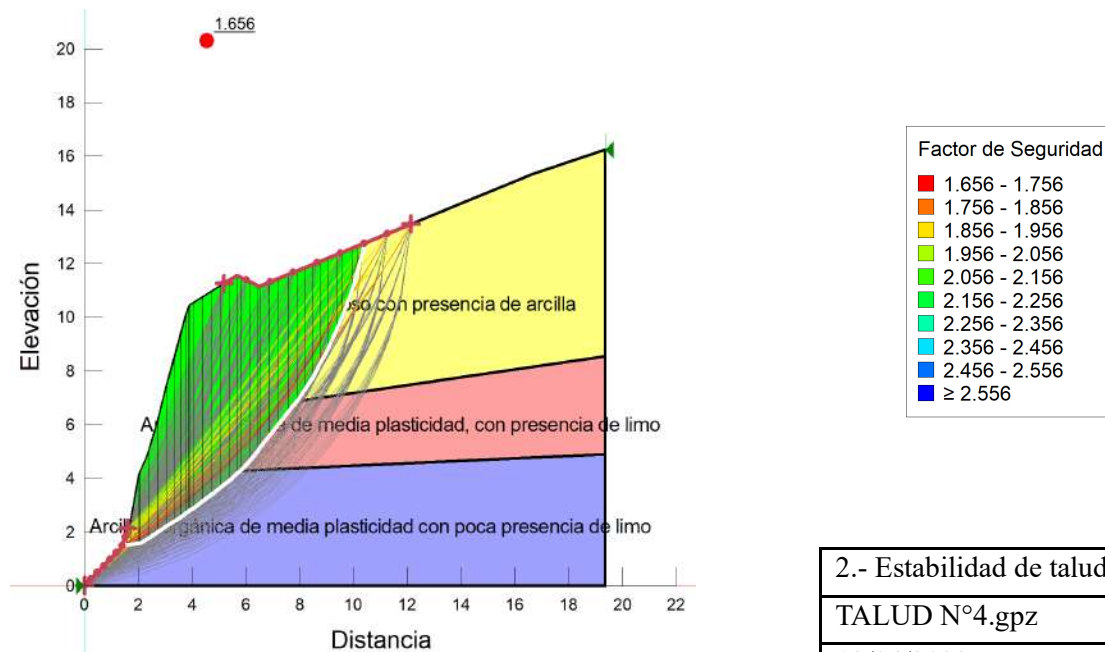


1.- Estabilidad de taludes Bishop	
TALUD N°4.gpz	
12/04/2023	1:213

Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.41. Estabilidad de talud N°4 método Morgenstern-Price

Color	Nombre	Modelo	Peso unitario (kN/m³)	Cohesión ' (KPA)	Phi ' (°)	Phi -B (°)
	Arcilla inorgánica de media plasticidad con poca presencia de limo	Mohr-Coulomb	27.75	65.8	24	0
	Arcilla inorgánica de media plasticidad, con presencia de limo	Mohr-Coulomb	27.85	88.55	31	0
	Suelo Arenoso con presencia de arcilla	Mohr-Coulomb	26.97	42.46	40	0

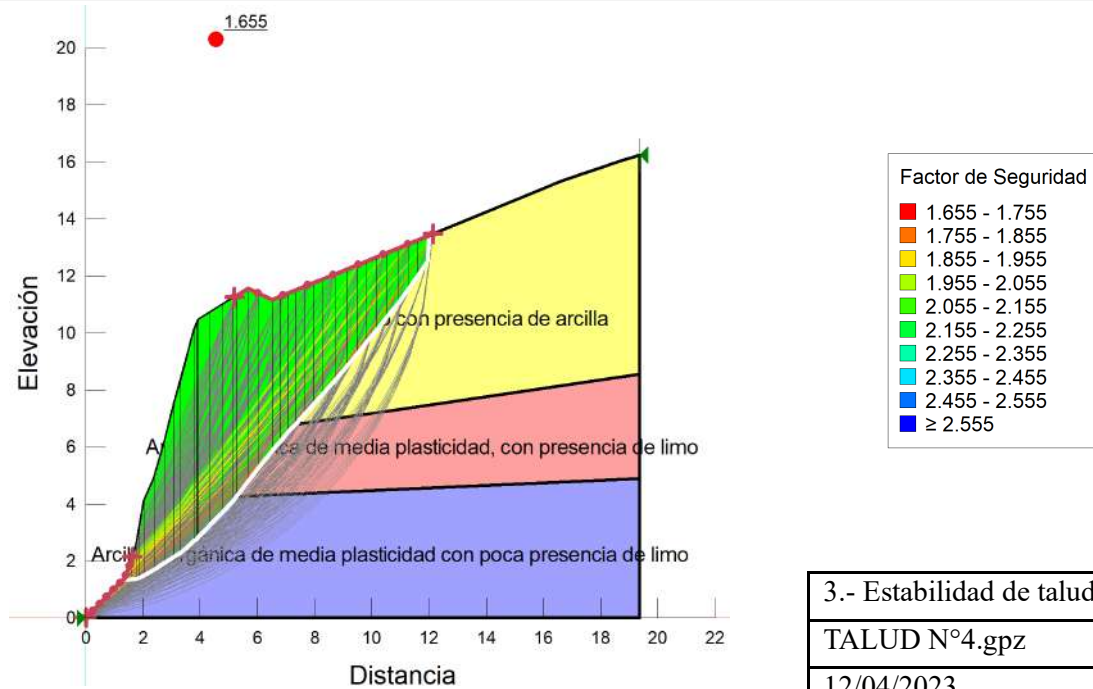


2.- Estabilidad de taludes Morgenstern-Price	
TALUD N°4.gpz	
12/04/2023	1:213

Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.42. Estabilidad de talud N°4 método Spencer

Color	Nombre	Modelo	Peso unitario (kN/m³)	Cohesión ' (KPA)	Phi ' (°)	Phi -B (°)
	Arcilla inorgánica de media plasticidad con poca presencia de limo	Mohr-Coulomb	27.75	65.8	24	0
	Arcilla inorgánica de media plasticidad, con presencia de limo	Mohr-Coulomb	27.85	88.55	31	0
	Suelo Arenoso con presencia de arcilla	Mohr-Coulomb	26.97	42.46	40	0

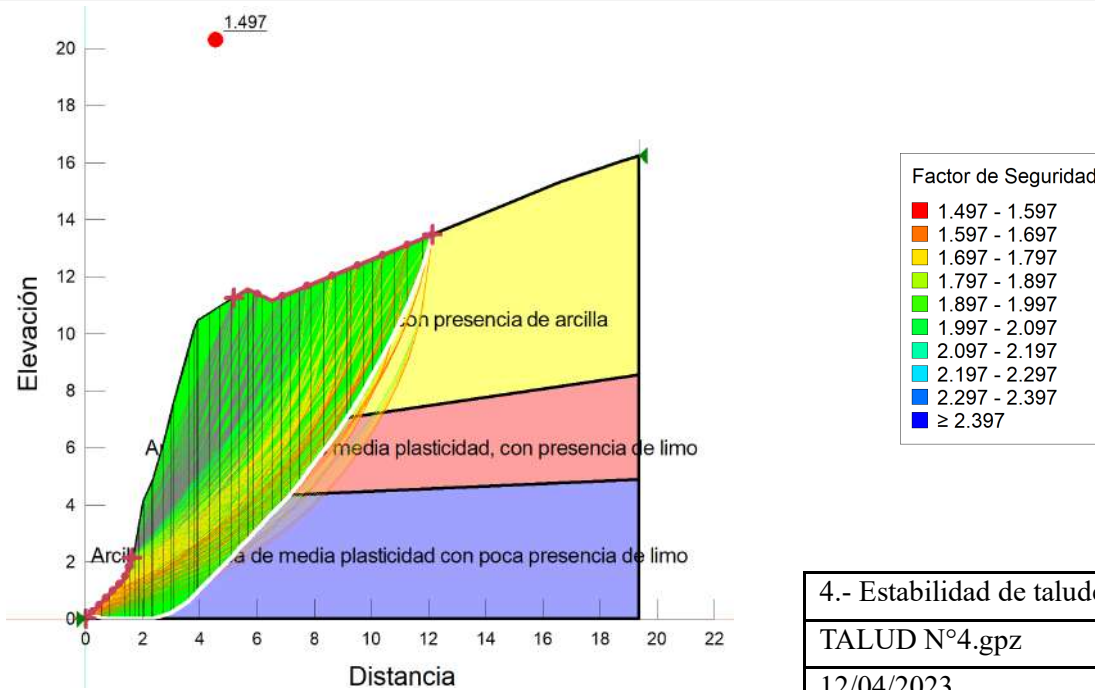


3.- Estabilidad de taludes Spencer	
TALUD N°4.gpz	
12/04/2023	1:213

Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

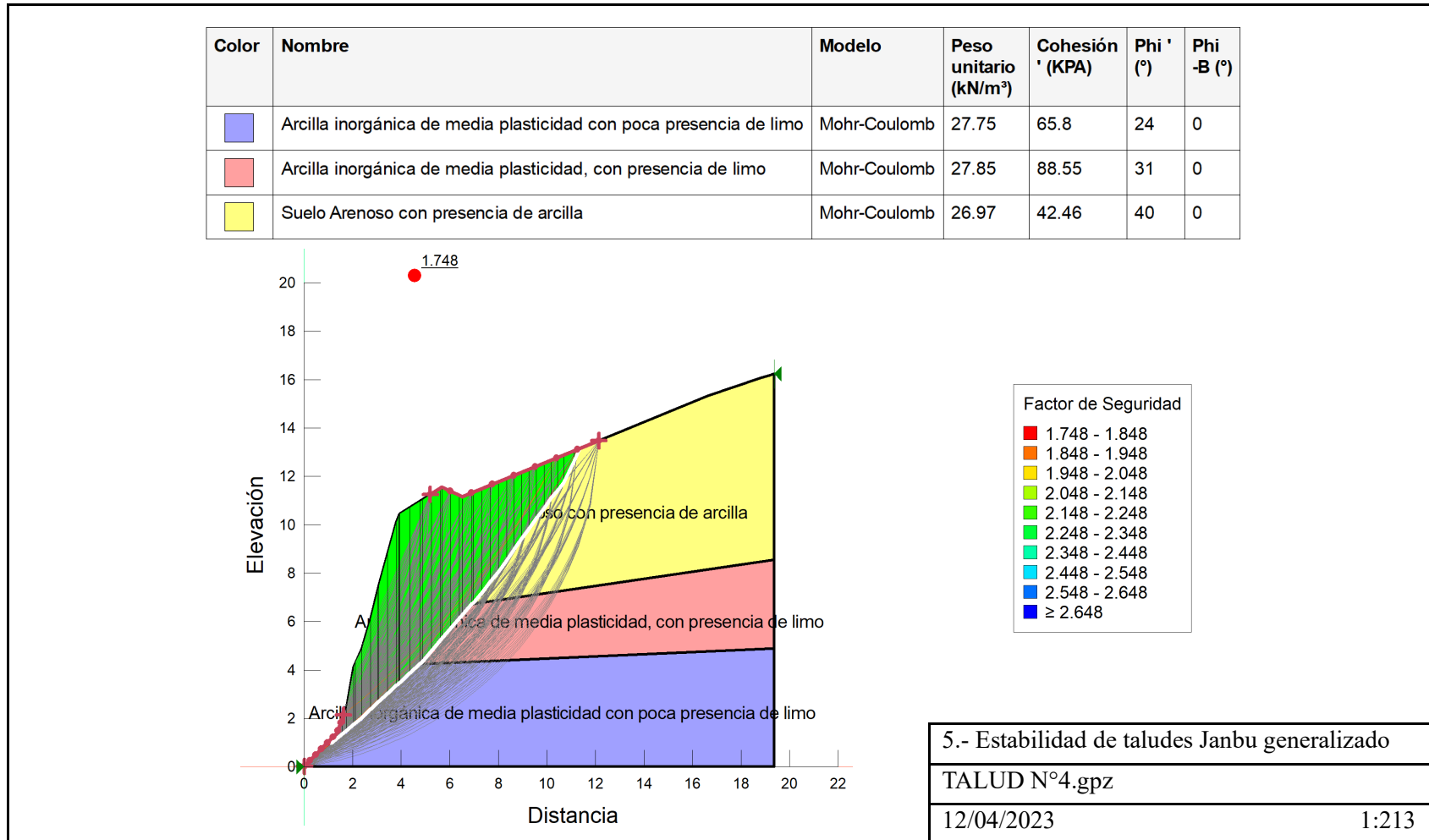
Figura 4.43. Estabilidad de talud N°4 método Janbu

Color	Nombre	Modelo	Peso unitario (kN/m³)	Cohesión ' (KPA)	Phi ' (°)	Phi -B (°)
	Arcilla inorgánica de media plasticidad con poca presencia de limo	Mohr-Coulomb	27.75	65.8	24	0
	Arcilla inorgánica de media plasticidad, con presencia de limo	Mohr-Coulomb	27.85	88.55	31	0
	Suelo Arenoso con presencia de arcilla	Mohr-Coulomb	26.97	42.46	40	0



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

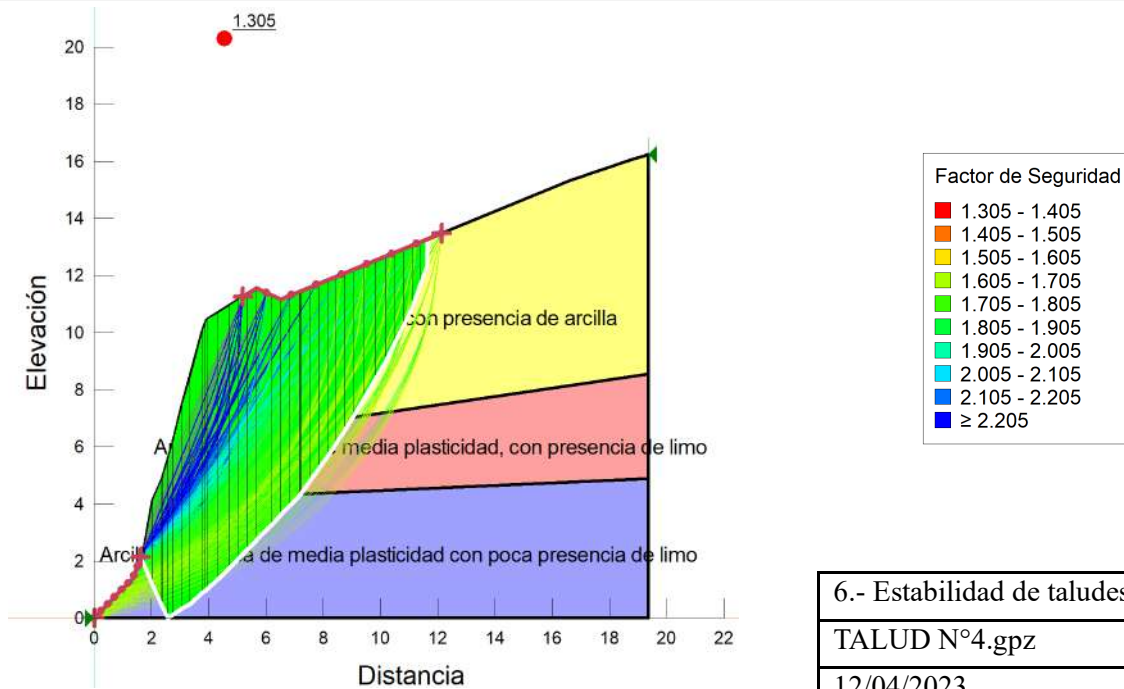
Figura 4.44. Estabilidad de talud N°4 método Janbu generalizado



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.45. Estabilidad de talud N°4 método Fallenius

Color	Nombre	Modelo	Peso unitario (kN/m³)	Cohesión ' (KPA)	Phi ' (°)	Phi -B (°)
	Arcilla inorgánica de media plasticidad con poca presencia de limo	Mohr-Coulomb	27.75	65.8	24	0
	Arcilla inorgánica de media plasticidad, con presencia de limo	Mohr-Coulomb	27.85	88.55	31	0
	Suelo Arenoso con presencia de arcilla	Mohr-Coulomb	26.97	42.46	40	0



6.- Estabilidad de taludes Fallenius	
TALUD N°4.gpz	
12/04/2023	1:213

Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

4.7. Análisis de estabilidad de taludes por diferentes métodos aplicando el programa Geo/Slope (Talud N°5)

Tabla 4.19. Puntos exportados de civil 3D para graficar en Geo/Slope (Talud N°5)

Punto	Progresiva (m)	Elevación (m)
1	0,00	0,00
2	0,41	0,78
3	1,54	2,50
4	2,67	4,22
5	3,18	5,03
6	3,63	5,45
7	4,07	5,87
8	4,66	6,50
9	5,53	7,05
10	6,41	7,61
11	7,21	8,19
12	8,23	8,13
13	10,28	8,00
14	12,33	7,88
15	13,43	7,32
16	14,52	6,77
17	14,78	6,62
18	17,47	6,00
19	20,17	5,37
20	20,81	5,33
21	22,68	4,78
22	23,73	4,48
23	30,00	4,48
24	30,00	0,00
25	0,00	0,00

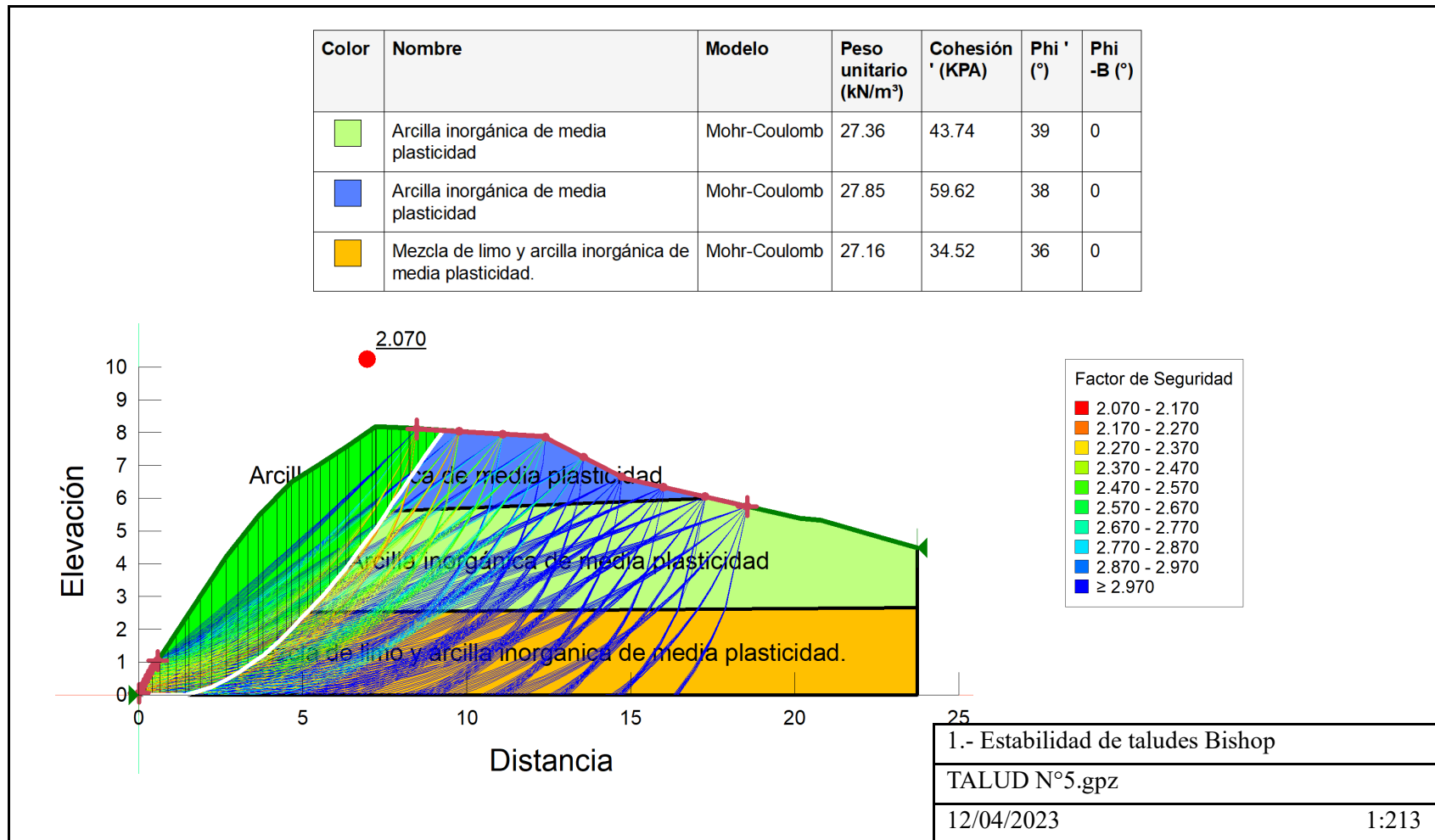
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.20. Características mecánicas del suelo (Talud N°5)

Talud N°5	Pie	2,77	27,16	0,35	34,52	36,00
	Cuerpo	2,79	27,36	0,45	43,74	39,00
	Corona	2,84	27,85	0,61	59,62	38,00

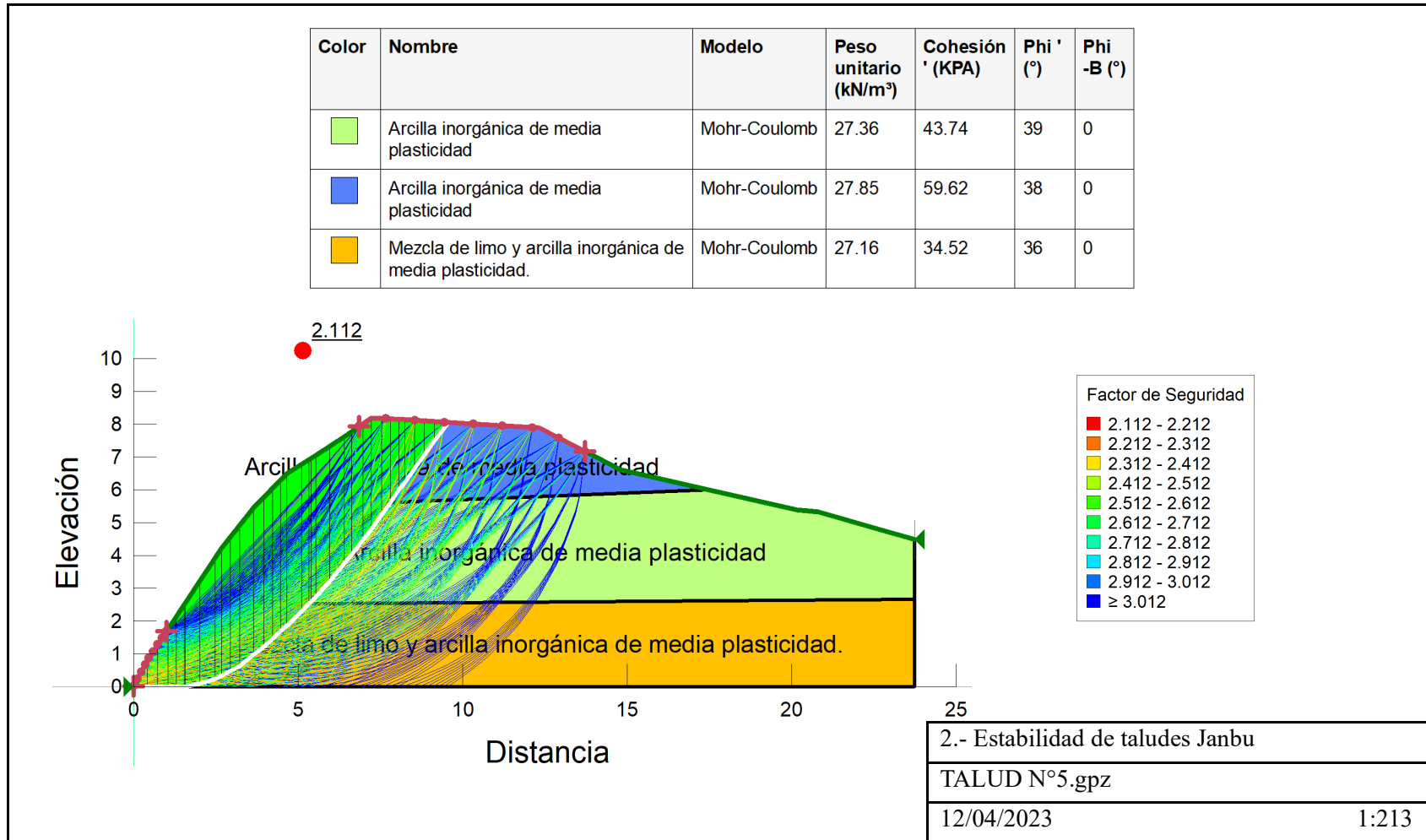
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.46. Estabilidad de talud N°5 método Bishop



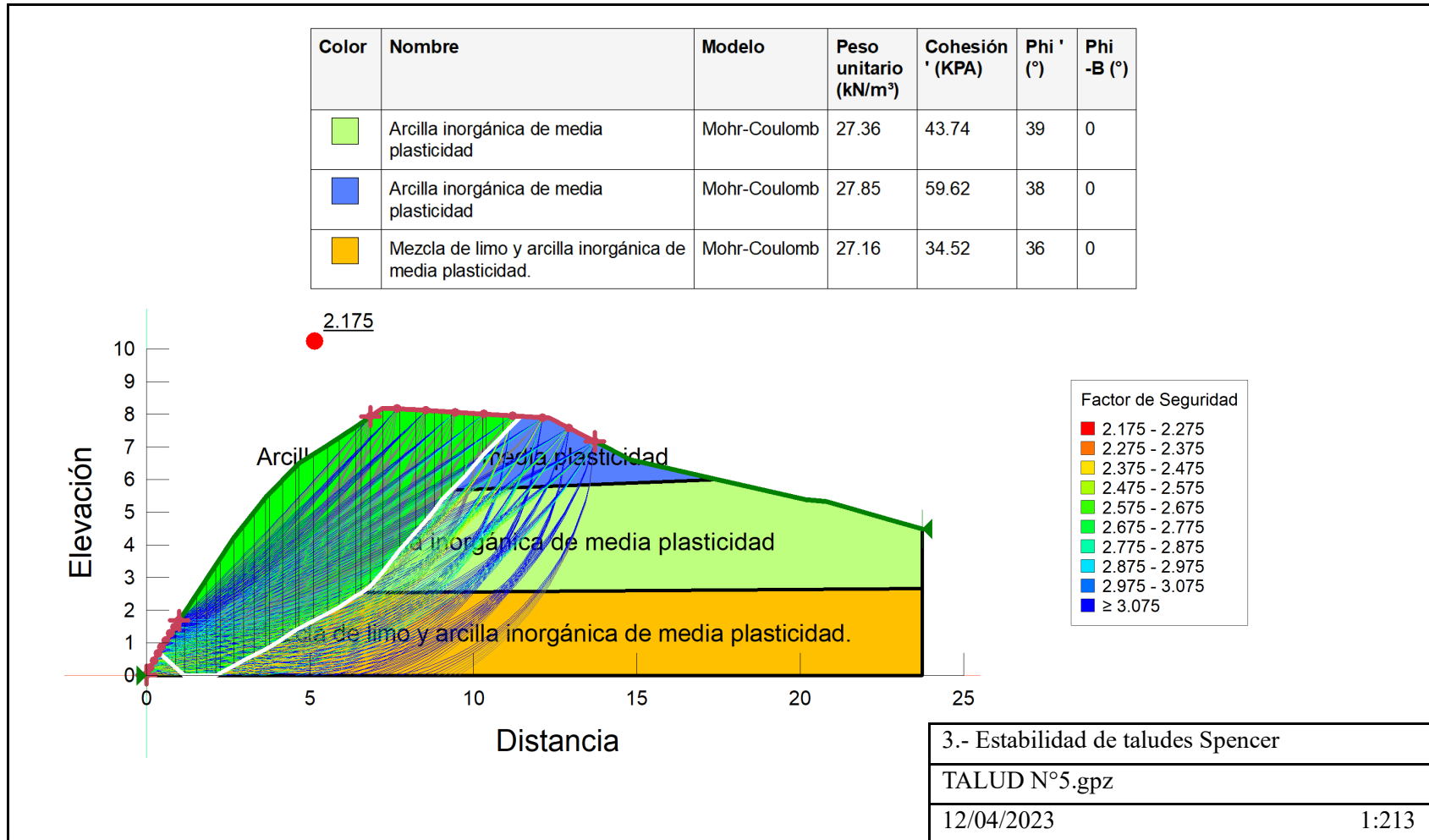
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.47. Estabilidad de talud N°5 método Janbu



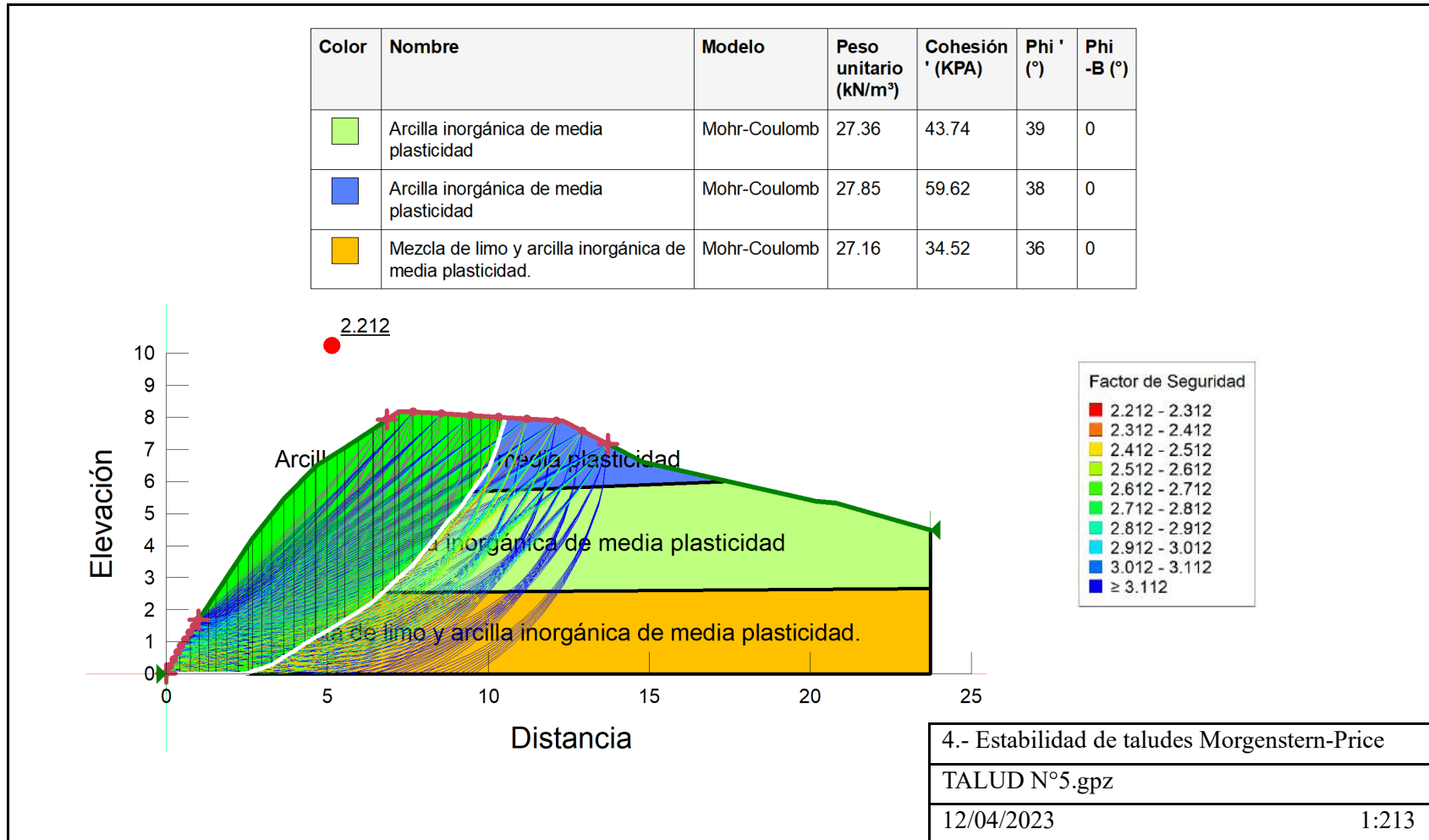
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.48. Estabilidad de talud N°5 método Spencer



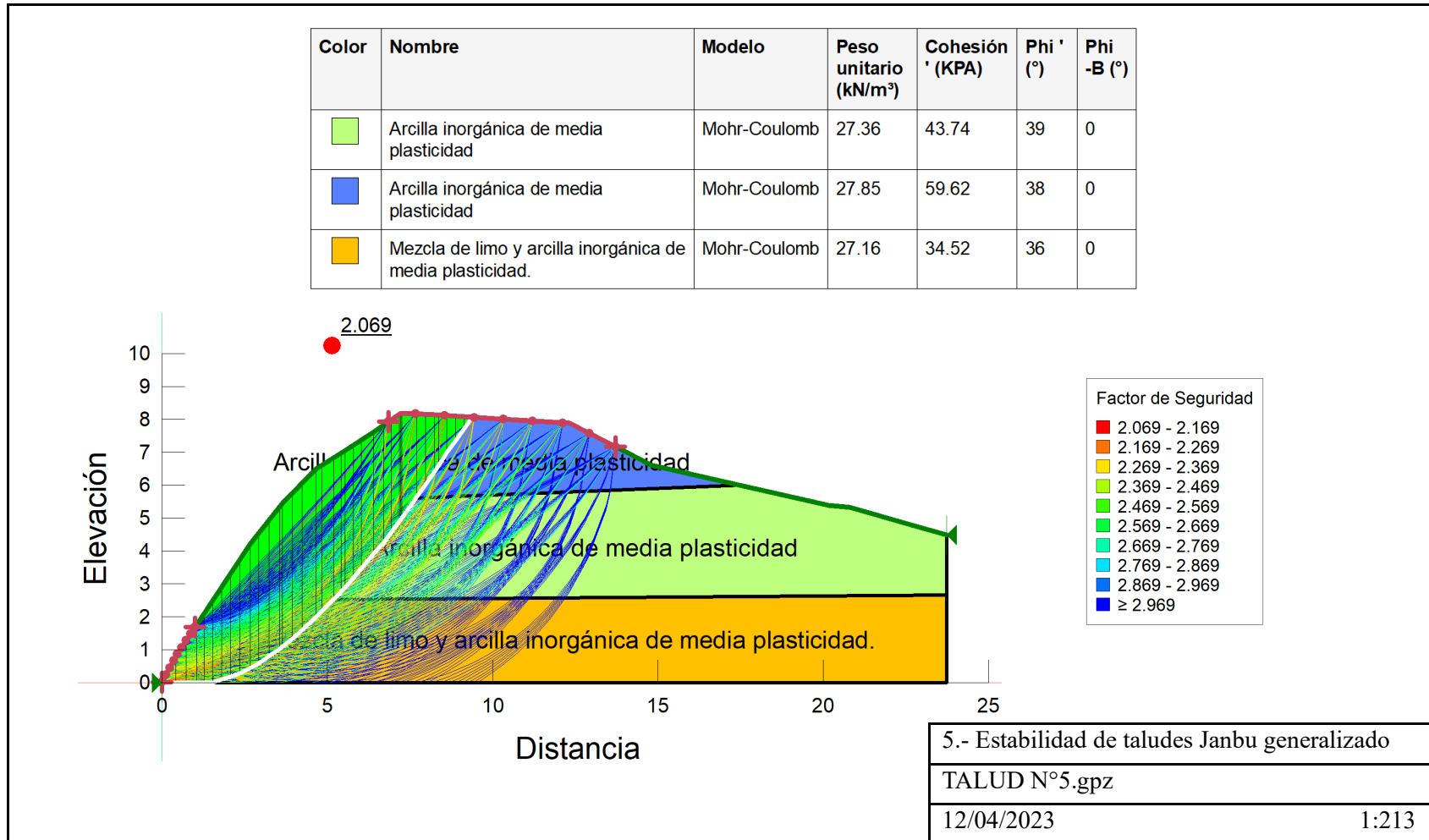
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.49. Estabilidad de talud N°5 método Morgenstern-Price



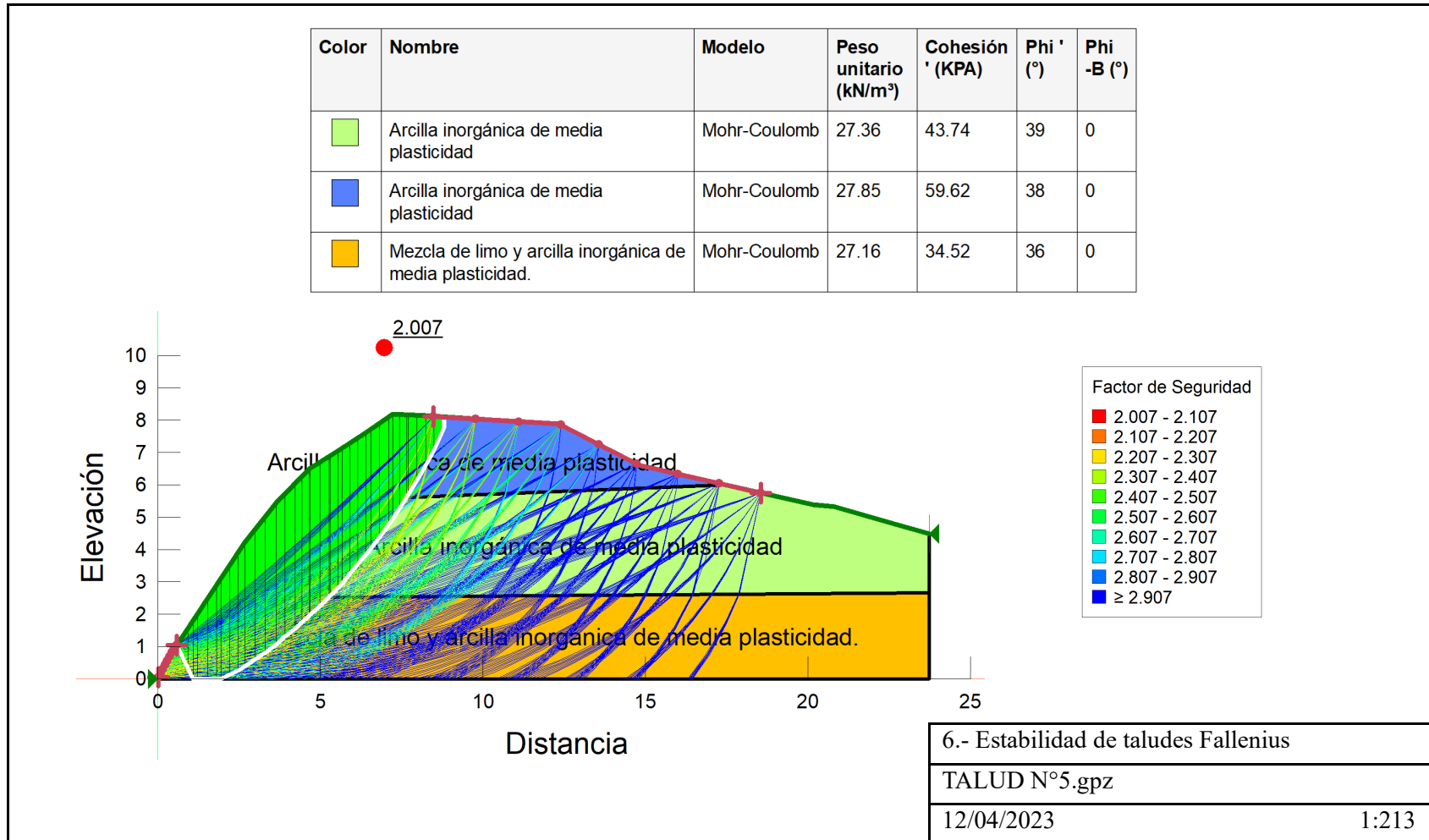
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.50. Estabilidad de talud N°5 método Janbu generalizado



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.51. Estabilidad de talud N°5 método Fallenius



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

4.8. Análisis y resultados

Tabla 4.21. Tabla de métodos y resultados del factor de seguridad con el programa Geo/Slope

Métodos	Taludes	Factor de Seguridad
Bishop	Talud N°1	1,30
	Talud N°2	1,36
	Talud N°3	1,57
	Talud N°4	1,43
	Talud N°5	2,07
Spencer	Talud N°1	1,28
	Talud N°2	1,23
	Talud N°3	1,56
	Talud N°4	1,65
	Talud N°5	2,17
Morgenstern-Price	Talud N°1	1,26
	Talud N°2	1,57
	Talud N°3	1,58
	Talud N°4	1,65
	Talud N°5	2,21
Janbu	Talud N°1	1,26
	Talud N°2	1,45
	Talud N°3	1,54
	Talud N°4	1,50
	Talud N°5	2,11
Janbu generalizado	Talud N°1	0,50
	Talud N°2	0,62
	Talud N°3	1,65
	Talud N°4	1,75
	Talud N°5	2,07
Fallenius	Talud N°1	0,95
	Talud N°2	1,42
	Talud N°3	1,39
	Talud N°4	1,30
	Talud N°5	2,01
Bishop (grilla y radio)	Talud N°1	1,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.22. Comparación de resultados obtenidos de forma manual y con el programa Geo/Slope

Talud N°	Método	Bishop	Talud N°	Método	Janbu	Talud N°	Método	Fallenius
1	Manual	1,70	3	Manual	0,46	4	Manual	1,08
	Geo/Slope	1,30		Geo/Slope	1,54		Geo/Slope	1,30

Fuente: Elaboración propia

4.8.1. Talud N°1

Resultados del análisis de factor de seguridad del talud N°1.

En la tabla 4.21, se presentan los resultados de los diferentes métodos de análisis empleados para determinar el factor de seguridad (FS.) del talud N°1. Los valores de FS. obtenidos son los siguientes:

- Método de Bishop: 1,30
- Método de Spencer: 1,28
- Método de Morgenstern-Price: 1,26
- Método de Janbu: 1,26
- Método de Janbu generalizado: 0,50
- Método de Fallenius: 0,95

Método de Bishop: Obtenemos un factor de seguridad (FS.) de 1,30. Comparando con la tabla 2.7, este valor se encuentra por debajo del rango del intervalo de diseño (1,50) y por encima del rango de construcción (1,25). Según la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50), y al compararlo con la tabla 2.9 de zonificación de amenazas por deslizamiento, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Spencer: El FS. de 1,28 está por debajo del rango de diseño (1,50) y del rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. Según la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a moderada (1,20).

Método de Morgenstern-Price: Con un FS. de 1,26, este valor está por debajo del rango de diseño (1,50) y por encima del rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a moderada (1,20).

Método de Janbu: El FS. de 1,26 está por debajo del rango de diseño (1,50) y por encima del rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. Según la Tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Janbu generalizado: Con un FS. de 0,50, este valor se ubica por debajo del rango de diseño (1,50) y es inadmisibles según el rango de construcción (1,25) en la tabla 2.7. Según la tabla 2.8, se clasifica como inadmisibles ($< 0,75$), y en la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación muy alta (< 1).

Método de Fallenius: El FS. de 0,95 está por debajo del rango de diseño (1,50) y también por del rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. Según la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad muy bajo (0,75-1,00) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación muy alta (< 1).

En un análisis adicional, se aplicó el método Bishop con superficie de falla de grilla y radio, obteniendo un valor de FS. de 1,41. Nuevamente, este FS. se sitúa por debajo del intervalo de diseño, por encima del de construcción y en el rango de clasificación de factores de seguridad aceptables. La escala de zonificación de amenazas por deslizamiento lo coloca más cerca de la categoría "baja".

Adicionalmente, se observó que, al realizar el análisis de forma manual con el método Bishop, se obtuvo un FS. de 1,70 que se encuentra en la categoría ideal según las tablas de diseño y construcción, en comparación con el valor obtenido por software (1,30). Esto se debe a diferencias en la metodología y la precisión de cálculo, donde el enfoque manual considera un perfil transversal dividido en tres secciones, mientras que el software analiza el perfil de manera horizontal y realiza numerosas iteraciones para encontrar el valor más certero.

4.8.2. Talud N°2

Resultados del análisis de factor de seguridad del talud N°2.

En la tabla 4.21, se presentan los resultados de los diferentes métodos de análisis empleados para determinar el factor de seguridad (FS.) del talud N°2. Los valores de FS. obtenidos son los siguientes:

- Método de Bishop: 1,36
- Método de Spencer: 1,23
- Método de Morgenstern-Price: 1,57
- Método de Janbu: 1,45
- Método de Janbu generalizado: 0,62
- Método de Fallenius: 1,42

Método de Bishop: Obtenemos un factor de seguridad (FS.) de 1,36. Comparando con la tabla 2.7, este valor se encuentra por debajo del rango del intervalo de diseño (1,50) y por encima del rango de construcción (1,25). Según la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50), y al compararlo con la tabla 2.9 de zonificación de amenazas por deslizamiento, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Spencer: El FS. de 1,23 está por debajo del rango de diseño (1,50) y del rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. Según la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a moderada (1,20).

Método de Morgenstern-Price: Con un FS. de 1,57, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Janbu: El FS. de 1,45 está por debajo del rango de diseño (1,50) y por encima del rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. Según la Tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Janbu generalizado: Con un FS. de 0,62, este valor se ubica por debajo del rango de diseño (1,50) y es inadmisibles según el rango de construcción (1,25) en la tabla 2.7. Según la tabla 2.8, se clasifica como inadmisibles ($< 0,75$), y en la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación muy alta (< 1).

Método de Fallenius: El FS. de 1,42 está por debajo del rango de diseño (1,50) y por encima del rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. Según la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

4.8.3. Talud N°3

Resultados del análisis de factor de seguridad del talud N°3.

En la tabla 4.21, se presentan los resultados de los diferentes métodos de análisis empleados para determinar el factor de seguridad (FS.) del talud N°3. Los valores de FS. obtenidos son los siguientes:

-Método de Bishop: 1,57

-Método de Spencer: 1,56

-Método de Morgenstern-Price: 1,58

-Método de Janbu: 1,54

-Método de Janbu generalizado: 1,65

-Método de Fallenius: 1,39

Método de Bishop: Con un FS. de 1,57, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Spencer: Con un FS. de 1,56, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Morgenstern-Price: El FS. de 1,58, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Janbu: Con un FS. de 1,54, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Janbu generalizado: El FS. de 1,65, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Fallenius: Obtenemos un factor de seguridad (FS.) de 1,36. Comparando con la tabla 2.7, este valor se encuentra por debajo del rango del intervalo de diseño (1,50) y por encima del rango de construcción (1,25). Según la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50), y al compararlo con la tabla 2.9 de zonificación de amenazas por deslizamiento, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Adicionalmente, se observó que, al realizar el análisis de forma manual con el método Janbu, se obtuvo un FS. de 0,46, Comparando con la tabla 2.7, se encuentra por debajo de la categoría de diseño, (1,50) y de construcción (1,25). En comparación con el valor obtenido por software (1,54). Esto se debe a diferencias en la metodología y la precisión de cálculo, donde el enfoque manual considera un perfil transversal dividido en tres secciones, mientras que el software analiza el perfil de manera horizontal y realiza numerosas iteraciones para encontrar el valor más certero.

4.8.4. Talud N°4

Resultados del análisis de factor de seguridad del talud N°4.

En la tabla 4.21, se presentan los resultados de los diferentes métodos de análisis empleados para determinar el factor de seguridad (FS.) del talud N°4. Los valores de FS. obtenidos son los siguientes:

-Método de Bishop: 1,43

-Método de Spencer: 1,65

-Método de Morgenstern-Price: 1,65

-Método de Janbu: 1,50

-Método de Janbu generalizado: 1,75

-Método de Fallenius: 1,30

Método de Bishop: Con un FS. de 1,43 está por debajo del rango de diseño (1,50) y por encima del rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. Según la Tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Spencer: El FS. de 1,65, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Morgenstern-Price: Obtenemos un factor de seguridad de 1,65, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Janbu: Con un FS. de 1,50, este valor se encuentra en el rango de diseño (1,50) y encima del rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación de baja (1,50).

Método de Janbu generalizado: Obtenemos un factor de seguridad de 1,75, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Fallenius: El (FS.) de 1,30. Comparando con la tabla 2.7, este valor se encuentra por debajo del rango del intervalo de diseño (1,50) y por encima del rango de

construcción (1,25). Según la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad aceptable (1,20-1,50), y al compararlo con la tabla 2.9 de zonificación de amenazas por deslizamiento, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Adicionalmente, se observó que, al realizar el análisis de forma manual con el método Fallenius, se obtuvo un FS. de 1,08, Comparando con la tabla 2.7, se encuentra por debajo de la categoría de diseño, (1,50) y de construcción (1,25). En comparación con el valor obtenido por software (1,30). Esto se debe a diferencias en la metodología y la precisión de cálculo, donde el enfoque manual considera un perfil transversal dividido en tres secciones, mientras que el software analiza el perfil de manera horizontal y realiza numerosas iteraciones para encontrar el valor más certero.

4.8.5. Talud N°5

Resultados del análisis de factor de seguridad del talud N°5.

En la tabla 4.21, se presentan los resultados de los diferentes métodos de análisis empleados para determinar el factor de seguridad (FS.) del talud N°5. Los valores de FS. obtenidos son los siguientes:

- Método de Bishop: 2,07
- Método de Spencer: 2,17
- Método de Morgenstern-Price: 2,21
- Método de Janbu: 2,11
- Método de Janbu generalizado: 2,07
- Método de Fallenius: 2,01

Método de Bishop: Obtenemos un factor de seguridad de 2,07, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Spencer: Con un FS. de 2,17, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica

como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Morgenstern-Price: El FS. de 2,21, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Janbu: El FS. de 2,11, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Janbu generalizado: Con un FS. de 2,07, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

Método de Fallenius: Obtenemos un factor de seguridad de 2,01, este valor supera el rango de diseño (1,50) y el rango de construcción (1,25) según la tabla 2.7. De acuerdo con la tabla 2.8, se clasifica como un factor de seguridad ideal ($>1,50$) y, al compararlo con la tabla 2.9, se encuentra en la clasificación más cercana a baja (1,50).

4.9. Análisis de cada método de estabilidad para los diferentes tipos de suelos en el tramo

4.9.1. Análisis del método de Fallenius para el talud N°1 y N°2

Según la clasificación de suelos realizada, se ha determinado que el talud N°1, correspondiente a la cabeza, se clasifica como un suelo del tipo A-2, caracterizado como un suelo (arenoso bien graduado). Por otro lado, el talud N°2, que forma el cuerpo del terreno, se ha clasificado como un suelo de tipo A-6, descrito como (arcilla inorgánica de media plasticidad). A continuación, se detallan las propiedades de cada uno de estos suelos:

Tabla 4.23. Valores de caracterización del talud N°1 y talud N°2

Talud N°1 (cabeza)	Talud N°2 (cuerpo)
Peso específico de 2,73 gr/cm ³	Peso específico de 2,8 gr/cm ³
Cohesión de 0,05 Kg/cm ² = 5,59 Kpa	Cohesión de 0,54 Kg/cm ² = 52,95 Kpa
Ángulo de fricción interna de 43°	Ángulo de fricción interna de 33°

Fuente: Elaboración propia

En el proceso de caracterización del talud N°1, obtenemos un valor de cohesión de 0,05 Kg/cm², lo que se clasifica como una arcilla arenosa firme según la tabla 2.11. Este valor de cohesión nos indica la poca existencia de material fino, falta de propiedad adherente de partículas entre sí, considerándola inestable.

Por otro lado, en el talud N°2 se registró un valor de cohesión de 52,95 Kpa, lo que lo clasifica como arcilla blanda según la tabla 2.12. Este valor nos indica que el suelo presenta una resistencia a la rotura a cortante.

En el análisis del talud N°1, tenemos un valor de ángulo de fricción interna de 43°, consideradas como material granular densa-seca según la tabla 2.13. Quiere decir, que presenta un suelo de compactación alta en función a la porosidad del suelo, obstruyendo el paso de los fluidos.

En el caso del talud N°2, hemos obtenido un valor de ángulo de fricción de 33°, considerado como material arcilloso inorgánica de mediana plasticidad como indica en la tabla 2.14, al ser un suelo inorgánico, hace referencia a un suelo formado por la descomposición de rocas al pasar el tiempo y de mediana plasticidad, hace mención a la capacidad de un material para ser deformado sin ruptura durante la aplicación de una fuerza externa.

La densidad en mecánica de suelos, dependerá de las características relacionadas con el tamaño de las partículas que componen un terreno. Así, si el suelo es de granos finos, la densidad de éste será mayor, que un suelo de granos gruesos, esto porque los granos finos ocuparan menos espacio (volumen) que los granos gruesos, pero habrá mayor cantidad del material (mayor masa, que será mayor peso). Los suelos de partículas gruesas ocupan más espacio y por ser granos de mayor tamaño, entre ellos existe una separación

significativa, lo que disminuye la cantidad de masa (peso) pero ocupa más espacio (volumen).

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

ρ = Densidad absoluta

m = Masa (Kg)

v = Volumen (m^3)

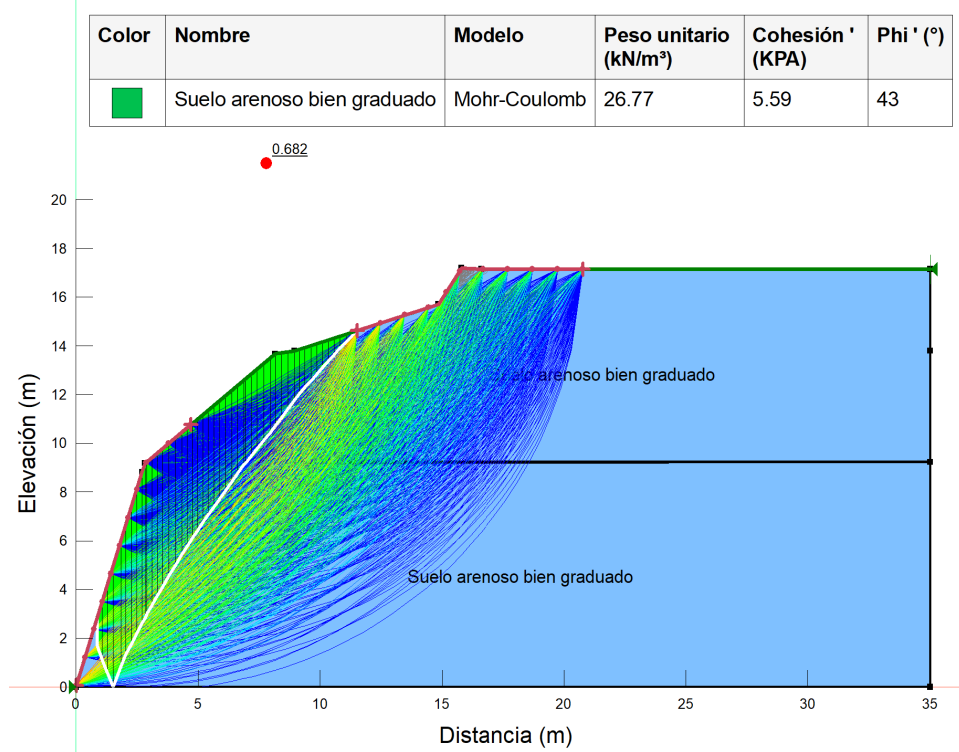
Un aspecto crucial en nuestro análisis, es el método de Fellenius es una técnica importante en la evaluación de la estabilidad del talud. Sin embargo, es fundamental destacar que se centra únicamente en el equilibrio de momentos y no considera el equilibrio de fuerzas, lo que lo distingue de otros métodos.

El método de las dovelas considera el estado de equilibrio de momentos, alrededor del centro del círculo de la masa del suelo conformada por franjas o dovelas.

Una de las limitaciones más significativas del método de Fellenius, es su incapacidad para considerar fuerzas entre las dovelas y no satisfacer el equilibrio de fuerzas tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy usado por su procedimiento simple. Resulta muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Arroja factores de seguridad bajos en círculos profundos.

Los análisis del método de Fellenius, para determinar el factor de seguridad del talud, son muy sencillos y se pueden realizar con métodos manuales o en el computador. Debe tenerse en cuenta que el método ordinario es menos preciso que otros procedimientos.

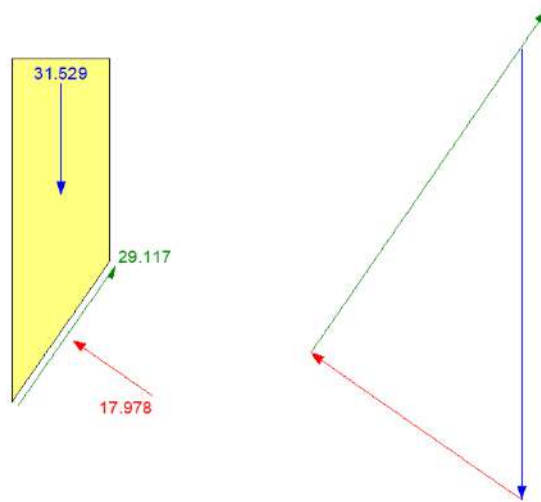
Figura 4.52. Estabilidad de talud N°1 (cabeza) método Fallenius



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

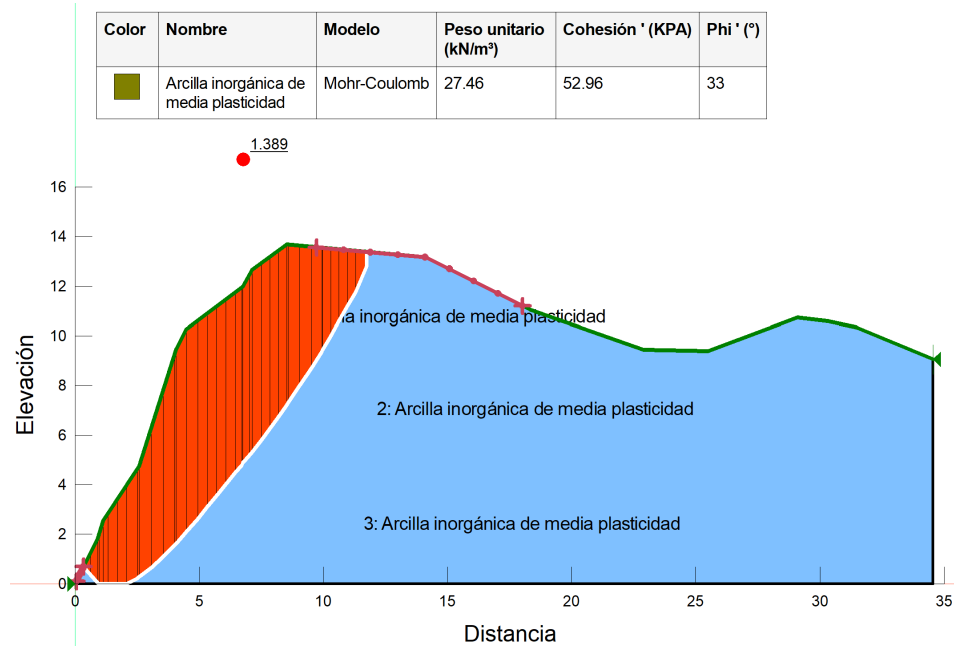
Figura 4.53. Diagrama de cuerpo libre de la dovela

Rebanada núm. 32 - Ordinario Método



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

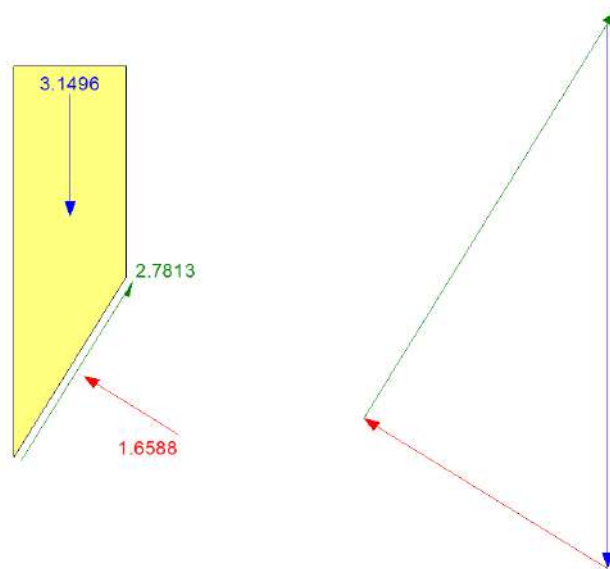
Figura 4.54. Estabilidad de talud N°2 (cuerpo) método Fallenius



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.55. Diagrama de cuerpo libre de la dovela

Rebanada núm. 32 - Ordinario Método



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Las fuerzas que actúan sobre una dovela de la misma sección transversal del talud, pero con diferentes métodos son:

- El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.
- Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.
- Las fuerzas de presión de tierra y cortante en las paredes entre dovelas, no son consideradas por Fellenius.
- No satisface el equilibrio de fuerzas

Después de analizar todas estas características, tanto del suelo y del mismo método obtenemos para el talud N°1, un valor de FS. 0,68. Este análisis indica que se encuentra por debajo de lo permisible según la tabla 2.7. Factores de seguridad por corte mínimo. Y el análisis del mismo modo, al talud N°2, obtenemos un FS. de 1,31, resultado que se encuentra por encima del permisible según la tabla 2.7. Factores de seguridad por corte mínimo.

4.9.2. Análisis del método de Bishop para el talud N°2 y N°3

Según la clasificación de suelos realizada, se ha determinado que el talud N°2, correspondiente a la cabeza, se clasifica como un suelo del tipo A-2, caracterizado como un suelo (arenoso con presencia de arcilla). Por otro lado, el talud N°3, que forma el pie del talud, se ha clasificado como un suelo de tipo A-4, descrito como (arcilla inorgánica de media plasticidad). A continuación, se detallan las propiedades de cada uno de estos suelos:

Tabla 4.24. Valores de caracterización del talud N°2 y talud N°3

Talud N°2 (cabeza)	Talud N°3 (pie)
Peso específico de 2,72 gr/cm ³	Peso específico de 2,79 gr/cm ³
Cohesión de 0,72 Kg/cm ² = 70,70 Kpa	Cohesión de 0,55 Kg/cm ² = 53,54 Kpa
Ángulo de fricción interna de 38°	Ángulo de fricción interna de 32°

Fuente: Elaboración propia

En el proceso de caracterización del talud N°2, hemos obtenido un valor de cohesión de 70,70 Kpa, considerada como un suelo arenoso con presencia de arcilla según la tabla 2.12. Este valor de cohesión nos indica la presencia de material fino, propiedad adherente de partículas entre sí.

Por otro lado, en el talud N°3, tenemos un valor de cohesión de 53,54 Kpa, lo que lo clasifica como una arcilla blanda, ligeramente inorgánica según la tabla 2.12. Este valor nos indica la presencia de material fino en el suelo, que tiende a ser adherente y presenta una resistencia a la rotura a cortante.

En el análisis del talud N°2, obtenemos un valor de ángulo de fricción interna de 38°, considerada como material arenoso densa seca según la tabla 2.13. Quiere decir, que presenta un suelo de compactación alta en función a la porosidad del suelo, evitando la capacidad de las plantas a desarrollarse, obstruyendo el paso de los fluidos.

En el caso del talud N°3, el valor del ángulo de fricción 33°, considerada como material arcilloso de mediana plasticidad como indica en la tabla 2.14.

Un aspecto crucial en nuestro análisis, se centra en el método de Bishop es una herramienta esencial en la estabilización de taludes que se fundamenta en el enfoque de las dovelas y considera la interacción de las fuerzas entre ellas. En este contexto, Bishop asume que estas fuerzas entre dovelas son predominantemente horizontales.

En el marco del método de Bishop, se asume una superficie de falla circular, donde la masa deslizante se divide en rebanadas verticales. Este enfoque tiene en cuenta las cargas externas y fuerzas normales, pero se ignora las tensiones tangenciales.

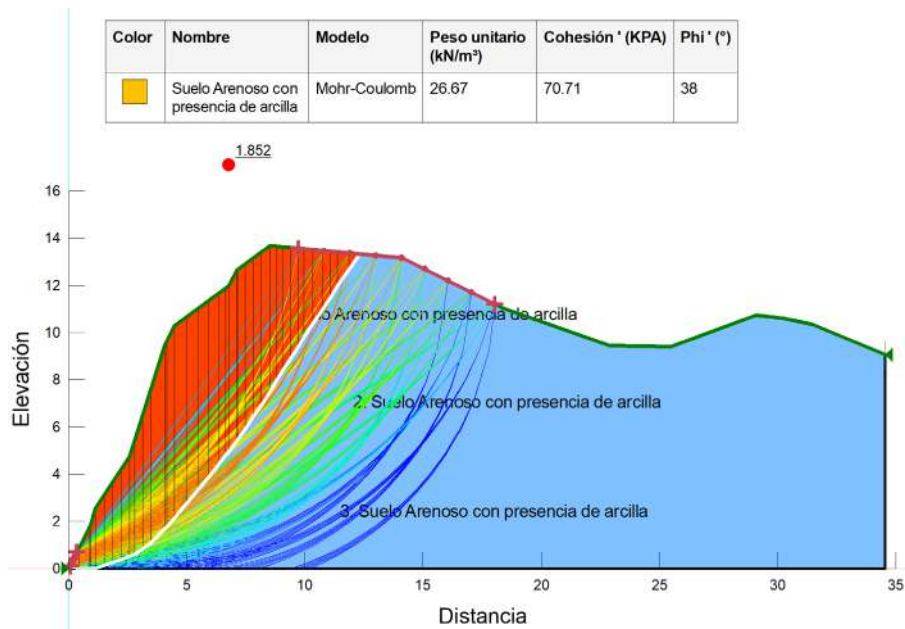
El método de Bishop, es altamente confiable, ya que su valor varía con un 5% con los métodos más precisos. Además, este método es versátil y puede aplicarse en superficies de falla que no son necesariamente circulares.

El método simplificado de Bishop, es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos.

Asume que todas las fuerzas de corte entre dovelas son nulas. Reduce el número de incógnitas. La solución es indeterminada debido a que no se establece condiciones de

equilibrio para una dovela. El cálculo se lleva a cabo buscando el equilibrio de momentos respecto al centro del arco circular.

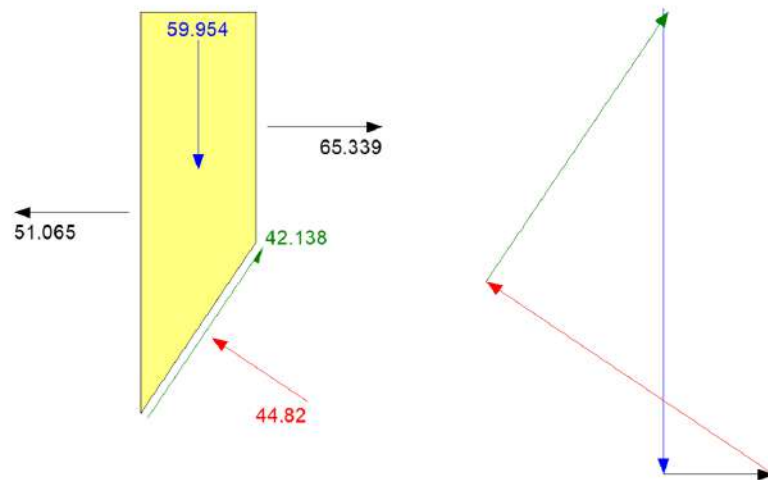
Figura 4.56. Estabilidad de talud N°2 (cabeza) método Bishop



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

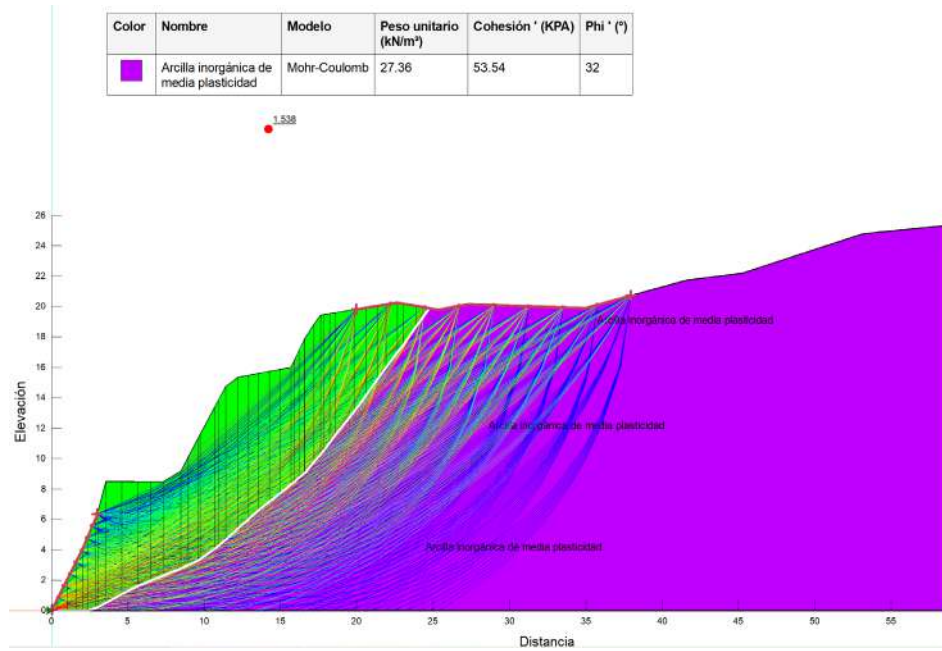
Figura 4.57. Diagrama de cuerpo libre de la dovela

Rebanada núm. 25 - Bishop Método



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

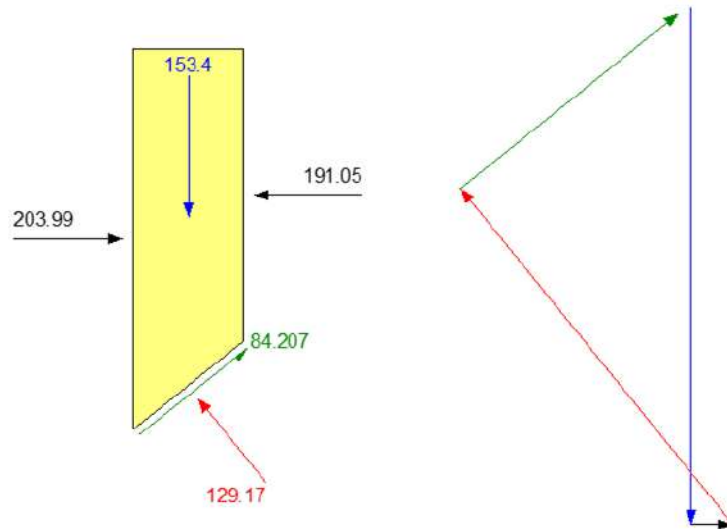
Figura 4.58. Estabilidad de talud N°3 (pie) método Bishop



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.59. Diagrama de cuerpo libre de la dovela

Rebanada núm. 25 - Bishop Método



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Las fuerzas que actúan sobre una dovela de la misma sección transversal del talud, pero con diferentes métodos son:

- El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.
- Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.
- Las fuerzas de corte entre dovelas son nulas.
- Satisface el equilibrio de momentos.

Después de analizar todas estas características, tanto del suelo y del mismo método obtenemos para el talud N°2 un valor de FS. 1,85. Este análisis indica que se encuentra por encima de lo permisible según la tabla 2.7. Factores de seguridad por corte mínimo. Y el análisis del mismo modo, al talud N°3, obtenemos un FS. de 1,54, resultado que se encuentra por encima del permisible según la tabla 2.7. Factores de seguridad por corte mínimo.

4.9.3. Análisis del método de Morgenstern-Price para el talud N°4 y N°5

Según la clasificación de suelos realizada, se ha determinado que el talud N°4, correspondiente al pie, se clasifica como un suelo del tipo A-7, caracterizado como un suelo (arcilloso de media plasticidad con poca presencia de limo). Por otro lado, el talud N°5, que forma el pie del talud, se ha clasificado como un suelo de tipo A-4, descrito como (mezcla de limo y arcilla inorgánica de media plasticidad). A continuación, se detallan las propiedades de cada uno de estos suelos:

Tabla 4.25. Valores de caracterización del talud N°4 y talud N°5

Talud N°4 (pie)	Talud N°5 (pie)
Peso específico de 2,83 gr/cm ³	Peso específico de 2,77 gr/cm ³
Cohesión de 0,67 Kg/cm ² = 65,80 Kpa	Cohesión de 0,35 Kg/cm ² = 34,52 Kpa
Ángulo de fricción interna de 24°	Ángulo de fricción interna de 36°

Fuente: Elaboración propia

En el proceso de caracterización del talud N°4, obtenemos un valor de cohesión de 65,80 Kpa, la tabla 2.12, nos indica que pertenece al grupo de suelo arcilloso blanda. Este valor de cohesión nos indica la presencia de material fino, propiedad adherente de partículas entre sí, de fácil trabajabilidad, presenta deficiencia en permeabilidad.

Por otro lado, en el talud N°5, se registró un valor de cohesión de 34,52 Kpa, la tabla 2.12, lo clasifica como una arcilla blanda, ligeramente inorgánica. Este valor nos indica que el suelo es de consistencia suave y natural, contiene poca presencia de material descompuesto por las rocas, presenta reducción de resistencia a la rotura a cortante, con escasa permeabilidad y alta elasticidad.

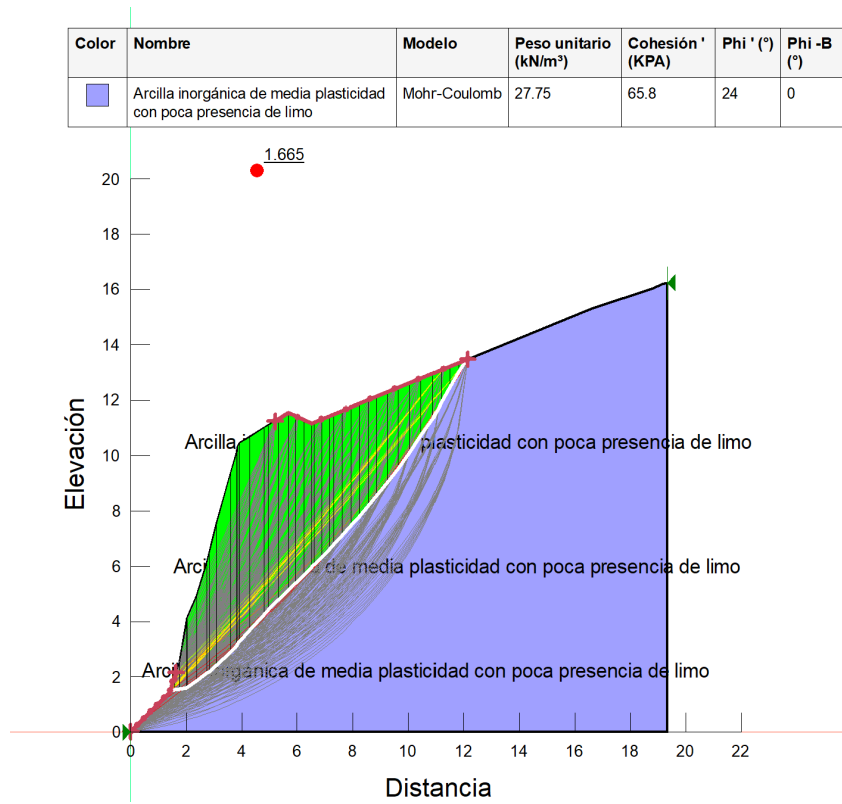
En el análisis del talud N°4, tenemos un valor de ángulo de fricción interna de 24°, de acuerdo a la tabla 2.11, este suelo contiene la presencia de limo firme, con moderada resistencia al corte y a la compresión.

En el caso talud N°5, hemos obtenido un valor de ángulo de fricción 36°, considerada como material limo arcilloso de mediana plasticidad según la tabla 2.14. Con moderada resistencia a la compresión y al corte.

Un aspecto crucial en la aplicación del método de análisis de Morgenstern-Price. Este método considera esfuerzos normales y cortantes entre tajadas, satisfaciendo equilibrio de fuerzas y de momentos.

Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método de Morgenstern-Price es muy similar al de Spencer, con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.

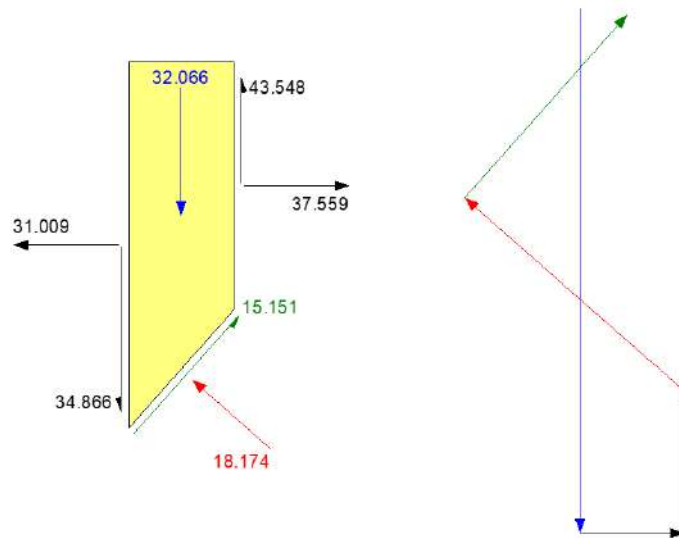
Figura 4.60. Estabilidad de talud N°4 (pie) método Morgenstern-Price



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

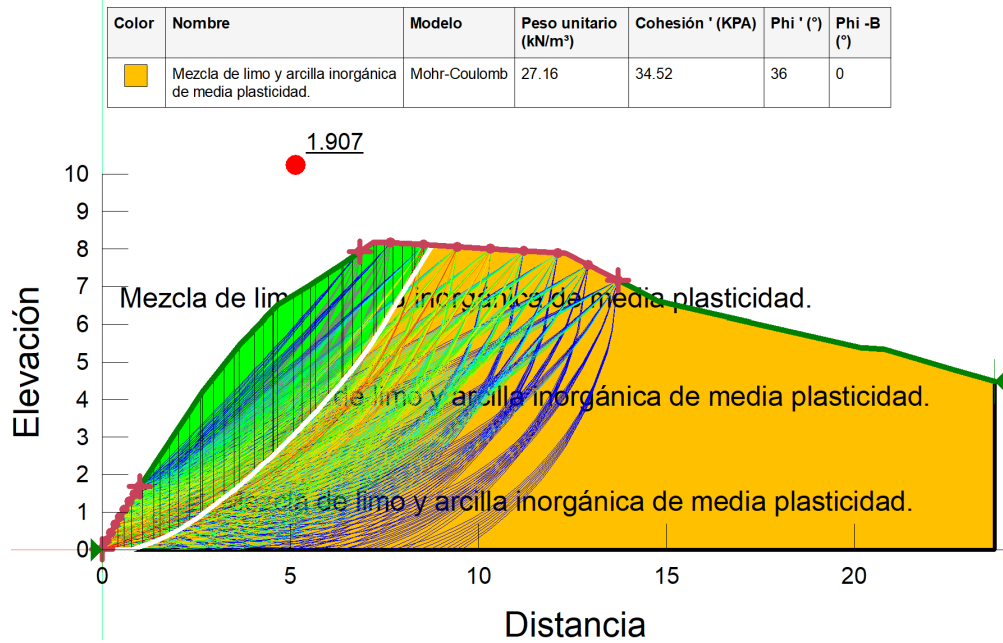
Figura 4.61. Diagrama de cuerpo libre de la dovela

Rebanada núm. 15 - Morgenstern-Price Método



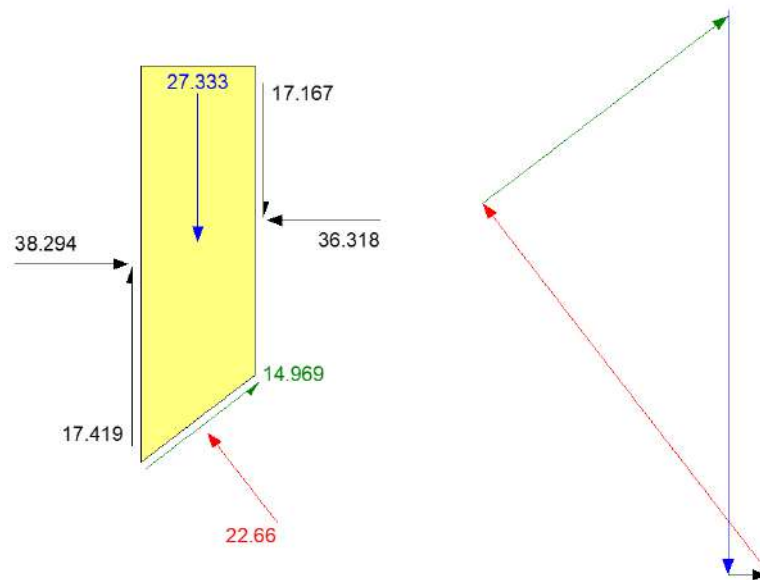
Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.62. Estabilidad de talud N°5 (pie) método Morgenstern-Price



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Figura 4.63. Diagrama de cuerpo libre de la dovela
Rebanada núm. 15 - Morgenstern-Price Método



Fuente: GeoStudio 2018 R2 Slope/W

Las fuerzas que actúan sobre una dovela de la misma sección transversal del talud, pero con diferentes métodos son:

- El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.
- Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.
- Considera los esfuerzos normales y cortantes en cada dovela
- Satisface el equilibrio de momentos y de fuerzas

Después de analizar todas estas características, tanto del suelo y del mismo método obtenemos para el talud N°4 un valor de FS. 1,67. Este análisis indica que se encuentra por encima de lo permisible según la tabla 2.7. Factores de seguridad por corte mínimo. Y el análisis del mismo modo, al talud N°5, obtenemos un FS. de 1,91, resultado que se encuentra por encima del permisible según la tabla 2.7. Factores de seguridad por corte mínimo.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Tras el análisis del programa Geo/Slope, aplicando al tramo Padcaya-Río Negro. Se logró obtener las modelaciones de las secciones transversales de los taludes y los diferentes resultados de factor de seguridad, entre distintas metodologías de autor y características de suelos.
- El procedimiento del análisis fue desarrollado de manera efectiva, siguiendo parámetros de cálculos recomendados por tutor guía del curso manejo del programa Geo/Slope.
- Se pudo identificar los puntos críticos en el tramo carretero, como también la obtención de muestras representativas, pie, cuerpo y cabeza del talud, para su respectivo análisis de caracterización y clasificación de suelos.
- En el transcurso de este estudio, se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo del programa de estabilidad de taludes Geo/Slope aplicado al tramo Padcaya-Río Negro, considerando múltiples análisis de suelos y la evaluación de diferentes métodos para determinar el factor de seguridad presentados por el programa.

Uno de los hallazgos más destacados de este estudio ha sido la disparidad en la precisión y la completitud de los métodos de análisis de estabilidad. En particular, se ha observado que el método de Fellenius, si bien es ampliamente utilizado, ha demostrado ser desfavorable debido a su imprecisión en la predicción de la estabilidad de los taludes. Esta imprecisión podría resultar en evaluaciones subestimadas o sobreestimadas de los riesgos asociados con la estabilidad de los taludes, lo que podría tener consecuencias significativas en la toma de decisiones en el diseño y construcción de infraestructuras.

Por otro lado, el método de Morgenstern-Price ha surgido como el más preciso y completo en términos de evaluar la estabilidad de los taludes en el tramo PADCAYA - RÍO NEGRO. Su capacidad para proporcionar resultados más confiables y detallados lo convierte en una herramienta invaluable para los

ingenieros civiles y profesionales involucrados en proyectos similares. La elección de este método no solo aumenta la precisión de las evaluaciones de estabilidad, sino que también contribuye a la seguridad y eficacia de la planificación y ejecución de proyectos de ingeniería civil.

- Para generar la superficie de falla del talud, entre los análisis (grilla y radio-entrada y salida), sobresale el de entrada y salida, por su mayor amplitud y capacidad de generar superficies de fallas y localizar al más crítico.
- Se realizó cálculos del factor de seguridad, resuelta de forma manual y se procedió a realizar una comparativa con los cálculos resueltos por el programa, haciendo mención que es mucho la diferencia entre el uno y el otro. El programa nos permite realizar la metodología de manera rápida y precisa, tomando en cuenta diversos factores, como las estratigrafías de forma horizontal, con n superficies de fallas y su cuantiosa iteración, hasta encontrar la superficie de falla más desfavorable y el factor de seguridad más crítico.

5.2. Recomendaciones

- El programa Geo/Slope, actualmente es el más usado a nivel internacional en estudios de estabilidad de taludes, debido a su fácil manejo e interpretación y sobre todo por su eficacia en los resultados.
- Geo/Slope, se puede usar para analizar casi cualquier problema de estabilidad de pendientes que se encuentre en sus proyectos de ingeniería geotécnica, civil y minería.
- Se recomienda el uso del programa, debido que contiene una serie de idiomas entre ellos el español y es un software de computador muy liviano, compatible con procesadores no muy exigentes.
- La utilización del programa con licencia completa, debido que obtendremos todos los campos habilitados para una mejor aplicación.
- Se recomienda realizar los análisis de suelos de manera eficaz, debido, que los resultados obtenidos será el reflejo en el programa.
- Es necesario realizar mantenimientos y limpiezas en la zona de estudio, por la presencia de material suelto, obstruyendo las cunetas y algunos materiales

dispersados sobre la plataforma de la carretera, dificultando y colando en riesgo la transitabilidad vial.

- Se sugiere que el tema de estabilidad de taludes entre más a profundidad en una de las asignaturas, debido a su grado de importancia en el cálculo de taludes, eh implica en el área de vías como ser en carreteras, en aguas que también abarca en el tema de taludes en presas y en obras civiles como ser en edificaciones, terraplenes etc.