

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos propensos a
deslizamiento en carreteras mediante el método de elementos
finitos**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Bach. Ronald Alccallaico Mogrovejo

Asesor:

Ing. Ferrer Canaza Rojas

Lima, setiembre del 2023

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Yo Ferrer Canaza Rojas, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUCIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS PROPENSOS A DESLIZAMIENTO EN CARRETERAS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS”** del Bach. Ronald Alccallaico Mogrovejo, tiene un índice de similitud de 8 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 15 días del mes de setiembre del año 2023.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ferrer Canaza Rojas', written over a horizontal line.

Ing. Ferrer Canaza Rojas

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los 07 día(s) del mes de **septiembre** del año 2023 siendo las **10:00 horas**, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Ing. David Díaz Garamendi**, el secretario: **Mg. Leonel Chahuares Paucar** y los demás miembros: **Mg. Reymundo Jaulis Palomino** y el asesor **Ing. Ferrer Canaza Rojas** con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos propensos a deslizamiento en carreteras mediante el método de elementos finitos"

..... de el(los)/la(las) bachiller/es: a) ... **RONALD ALCCALLAICO MOGROVEJO**

..... b)

..... conducente a la obtención del título profesional de:

..... **INGENIERO CIVIL**

con mención en

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **RONALD ALCCALLAICO MOGROVEJO**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	17	B+	MUY BUENO	SOBRESALIENTE

Candidato (b):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente
Ing. David Díaz
Garamendi

Secretario
Mg. Leonel
Chahuares
Paucar

Asesor
Ing Ferrer Canaza
Rojas

Miembro
Mg. Reymundo
Jaulis Palomino

Miembro



Candidato/a (a)
Ronald Alccallaico
Mogrovejo

Candidato/a (b)

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	6
2.	ANTECEDENTES.....	6
3.	UBICACIÓN Y GEOLOGÍA DEL AREA DE ESTUDIO	6
4.	METODOLOGÍA	7
4.1.	MODELO NUMÉRICO	8
4.2.	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	8
4.3.	CRITERIO DE FALLA DEL MACIZO ROCOSO	8
4.4.	CRITERIO DE FALLA DE LAS JUNTAS	9
5.	EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES SANTA INÉS – HUANCVELICA	9
5.1.	UNIDAD LITOLÓGICA Y ESTRUCTURAL DEL MACIZO ROCOSO	9
5.2.	CARÁCTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	11
5.3.	CARACTERIZACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES.....	11
5.4.	ANÁLISIS CINEMÁTICO.....	12
5.5.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MEDIANTE MEF Y MEL	12
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	14
	CONCLUSIÓN.....	15
	REFERENCIAS	15

EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS PROPENSOS A DESLIZAMIENTO EN CARRETERAS MEDIANTE EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

EVALUATION OF THE STABILITY OF ROCK SLOPES PRONE TO LANDSLIDE ON HIGHWAYS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Ronald Alccallaico Mogrovejo¹, Ferrer Canaza Rojas²

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú

Recibido (Received): 11/08/2023.

RESUMEN

La inestabilidad de taludes en macizos rocosos de proyectos viales, se debe a que muchos de los análisis no se consideran de manera cuidadosa las condiciones geomecánicas y estructurales que presenta el macizo rocoso, así como, los métodos que se emplean frecuentemente. La carretera Huancavelica – Santa Inés – Empalme Ruta 28A, vía los Libertadores (Pámpano) en el Perú, atraviesa un terreno geomorfológico muy variable en suelos y rocas. En la presente investigación se llevó a cabo una evaluación geotécnica detallada de los 7 sectores de análisis en macizos rocosos. Para poder delimitar y verificar las formaciones en campo se hizo uso de la información proporcionado por el INGEMMET, así como, los criterios de caracterización de RMR de Bieniawski y GSI de Hoek-Brown para realizar la evaluación de las condiciones estructurales y las mediciones de las características del macizo rocoso. Una vez extraído y trasladado las muestras representativas se procedió a ensayar en el laboratorio de mecánica de rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería donde se determinó las propiedades físicas y geomecánicas. La caracterización del modelo para el análisis mediante el MEF se consideró las orientaciones de las discontinuidades del análisis cinemático. Durante el análisis en condición pseudoestático mediante el MEF y MEL se observó que el factor de seguridad varía significativamente, donde el MEF posee valores conservadores cercanos a 1.1. Además, se determinó que las discontinuidades condicionan la estabilidad en taludes de menor altura y que el factor de seguridad es inversamente proporcional a las condiciones geomecánicas que presenta el macizo rocoso.

Palabras Clave: Macizo rocoso, Índice de Resistencia Geológica (GSI), Calificación de la masa rocosa (RMR), Método de Elementos Finitos (MEF), Método de Equilibrio Límite (MEL).

ABSTRACT

The instability of slopes in rock massifs of road projects is due to the fact that many of the analyzes do not carefully consider the geomechanical and structural conditions presented by the rock massif, as well as the methods that are frequently used. The Huancavelica – Santa Inés – Junction Route 28A, via Los Libertadores (Pámpano) in Peru, crosses a very variable geomorphological terrain in soils and rocks. In the present investigation, a detailed geotechnical evaluation of the 7 sectors of analysis in rock massifs was carried out. In order to delimit and verify the formations in the field, the information provided by INGEMMET was used, as well as the Bieniawski RMR and Hoek-Brown GSI characterization criteria to evaluate the structural conditions and measurements of the characteristics of the rock mass. Once the representative samples were extracted and transferred, they were tested at the rock mechanics laboratory of the National Engineering University where the physical and geomechanical properties were determined. The characterization of the model for the FEM analysis considered the orientations of the discontinuities of the kinematic analysis. During the analysis in pseudo-static condition by means of the FEM and LEM, it was observed that the safety factor varies significantly, where the FEM has conservative values close to 1.1. In addition, it was determined that the discontinuities condition the stability in slopes of lower height and that the safety factor is inversely proportional to the geomechanical conditions of the rock mass.

Keywords: Rock mass, Geological Strength Index (GSI), Rock Mass Rating (RMR), Finite Element Method (FEM), Limit Equilibrium Method (LEM).

* Corresponding author.:

Email: ronaldalccallaico@upeu.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

Las obras de ingeniería civil, como carreteras, autopistas, vías férreas, entre otros, generan cambios en la geometría de las laderas, debiendo aplicarse la geotecnia para lograr que dichos cortes resulten estables [1]. El sistema de transporte carretera es uno de los modos de movilización de pasajeros y mercancías más importante a nivel mundial debido a su amplia flexibilidad [2], según el Sistema Nacional de Carreteras (SINAC) del MTC la infraestructura vial existente de la región de Huancavelica respecto al año 2022, se tiene que, a nivel nacional un avance de 78.74% de vías pavimentadas, pero a nivel regional solo se tiene el 1%, esto indica que la mayoría de carreteras de la región de Huancavelica tienen que ser mejorados, implicando estudios geológicos y geotécnicos para sectores donde se requiera cortes de talud.

Actualmente la mayoría de los estudios de estabilidad se basan en los Métodos de Equilibrio Límite en donde se considera la relación de entre las fuerzas deslizantes y resistivas a lo largo de una superficie dado [3]. Sin embargo, en los últimos tiempos se ha incrementado significativamente el uso del Método de Elementos Finitos el cual considera las relaciones esfuerzo-deformación, por lo que la rotura no se da de forma instantánea, sino que es un proceso continuo [1] [4].

La técnica de modelización numérica ha permitido a los investigadores comprender la respuesta geomecánica del material bajo cargas estáticas y dinámicas [5]. En un sentido más amplio, los métodos numéricos pueden clasificarse en continuos, discontinuos e híbridos. Los métodos continuos incluyen el método de elementos finitos (MEF), el método de diferencias finitas (MDF), el método de volúmenes finitos (MVF) y el método de elementos de contorno (MEB), mientras que los métodos discontinuos incluyen el método de elementos discretos (MED) y el método de redes de fracturas directas (MFD) [6], [7],[8]. Según Jing (2003) [7] menciona que el método híbrido se aplica para comprender los problemas relacionados con el flujo y las tensiones.

Para la caracterización del modelo mediante el MEF y MEL, tanto para rocas intactas y las discontinuidades, se ha adoptó el criterio de Hoek-Brown para roca intacta y el criterio de Barton y Choubey para la resistencia de cizallamiento para las discontinuidades, utilizando los parámetros de rugosidad (JRC) y resistencia de la pared (JCS) [9].

Basándose en la toma de datos *in situ* y los datos de laboratorio, este estudio busca evaluar la estabilidad de taludes rocosos propensos a deslizamiento mediante el método de elementos finitos considerando la influencia de las propiedades geomecánicas e incorporando explícitamente las características estructurales como las discontinuidades que presenta el macizo rocoso para luego comparar con el método de equilibrio limite.

2. ANTECEDENTES

Existen numerosos estudios donde se analiza la estabilidad, de taludes en determinadas obras lineales, sin embargo, son pocas las investigaciones realizadas mediante el método de elementos finitos, así como la caracterización de los modelos de análisis de macizos rocosos. A continuación, se destacan algunas investigaciones:

Según Pozo [10] analiza la estabilidad de taludes rocosos considerando la representación explícita de las discontinuidades y el efecto escala mediante el MEF, en donde concluye que las discontinuidades a nivel de bancos son más influyentes que las propiedades de la roca intacta.

En el estudio realizado por Lojano y Vintimilla [11], [12], han determinado que el factor de seguridad mediante el MEL y MEF se obtuvieron resultados similares no solo en el factor de seguridad sin que también en la ubicación de la superficie de falla. Así mismo R.E. Hammah et al. [3] sugiere que el método de elementos finitos es una alternativa potente y viable, por la capacidad de predecir las tensiones y deformaciones del macizo rocoso así como, de elementos de soporte.

Valeriano & Moses et al. [13], [14] presentan un enfoque integrado de análisis mediante la caracterización del macizo rocoso, métodos cinemáticos y numéricos. Se describen las características litológicas, toma de muestras de campo y ensayos de laboratorio. Concluyen que las discontinuidades provocan diferentes mecanismos de falla y que la variación de la pendiente del talud con respecto al análisis cinemático ofrecería un equilibrio favorable entre la seguridad y la economía.

La evaluación de los taludes rocosos realizado por Prasad & Siddique [5], mediante la modelización numérica nos permite formular y lograr un diseño seguro y sólido. Mediante esta investigación se ha comparado los criterios de Mohr Coulomb y el criterio no lineal generalizado de Hoek-Brown en donde concluye que este último criterio ajusta a las condiciones predominantes de campo.

3. UBICACIÓN Y GEOLOGÍA DEL AREA DE ESTUDIO

El proyecto de mejoramiento de la carretera Huancavelica Santa Inés, está ubicada en los distritos de Huancavelica, Ascensión, Santa Ana, Pilpichaca, provincias de Huancavelica, Castrovirreyna y Huaytará, en la región Huancavelica tal como se muestra en la (fig. 1), el cual comprende un terreno montañoso con una topografía variable desde los 3690 msnm hasta los 4860msnm. Así mismo, el clima durante el año varía entre 20°C y 3°C la máxima y mínima respectivamente, moderadamente lluvioso y con amplitud térmica moderada, pero con fuertes variaciones de

temperatura entre el día y la noche, frecuencia de heladas, hielo y granizo [15].

La región de Huancavelica se encuentra del dominio morfo estructural de la Cordillera de Occidental. Presenta unidades Geomorfológicas como: piedemontes conformados por materiales depositados por acción glaciár durante el Pleistoceno-Holoceno a las cuales se denominan morrenas. Montañas conformadas por afloramientos de asociaciones de rocas volcánosedimentarias, de tipo Tobas y brechas basálticas, lavas andesíticas intercaladas con areniscas, limolitas, conglomerados y calizas de las Formaciones Auquilca, Castrovirreyna y Sacsaquero. Valles formados por la acción del glaciár las cuales se encuentran activo y en desarrollo, se pueden encontrar cuerpos de agua (bofedales) las cuales ocupan las concavidades que presenta el valle [15].

La montaña estructural en roca sedimentaria, conservan su estructura original a pesar de haber sido afectadas por procesos denudacionales fluvioerosionales y glaciár, su comportamiento geodinámico podría provocar caída de rocas por vuelco, fallas planares y en cuña cuando las pendientes se encuentran inclinadas a favor de la pendiente de la ladera. Así mismo, la Montaña en roca volcánica conformado tobas, tufos y derrames lávicos andesíticos, que comprenden a rocas volcánicas de las Formaciones Huando, Tántara, Caudalosa y Julcani, que fueron depositados por la actividad volcánica explosiva y efusiva que se produjo en el Paleógeno y Neógeno-Mioceno, su ocurrencia geodinámica está asociada a flujos de detritos, deslizamientos, caída de rocas desde las cumbres y acantilados por la actividad glaciár [15], [16].

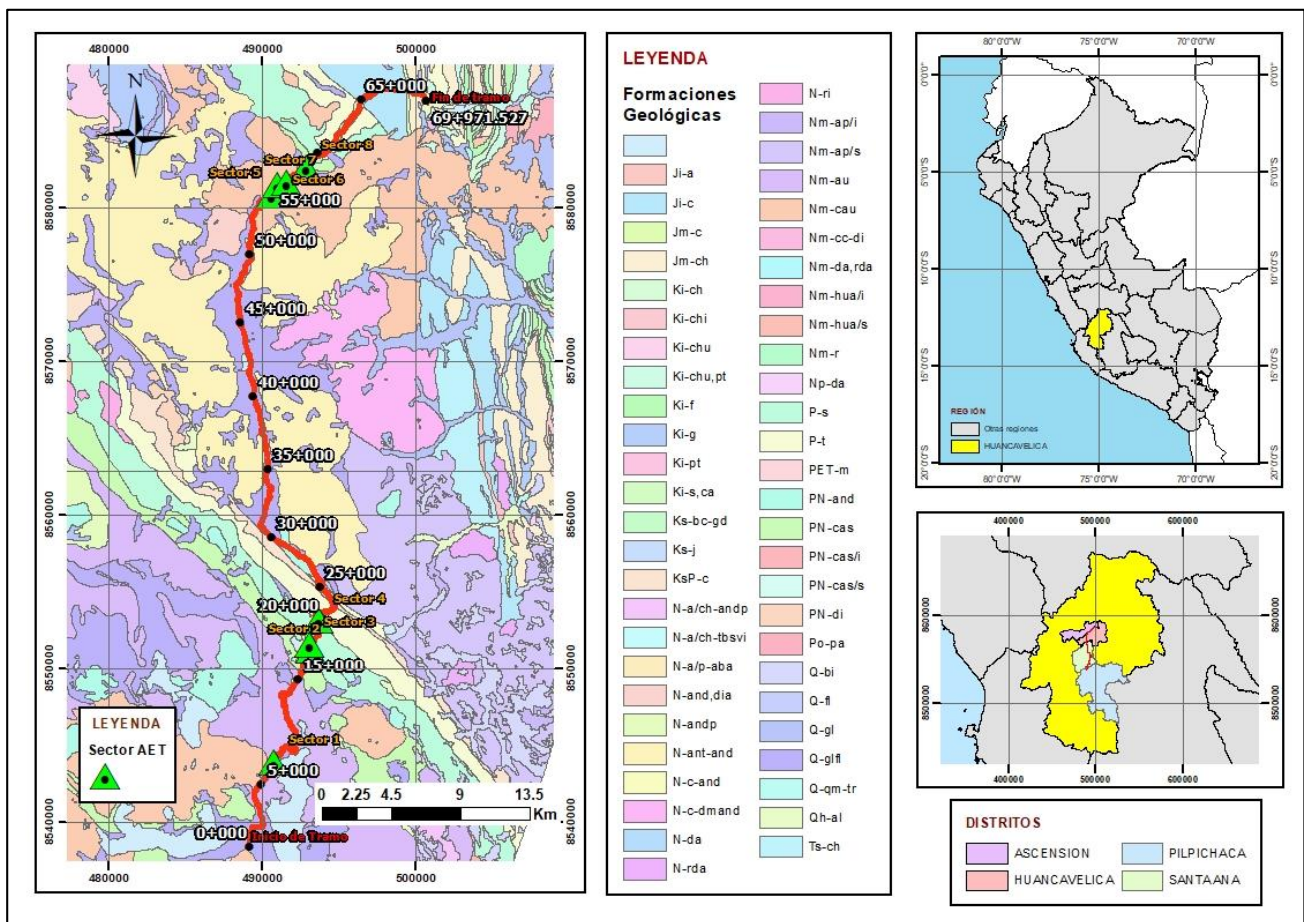


Fig. 1. Taludes investigados en mapa geológico y la ubicación de la zona de estudio

4. METODOLOGÍA

El planteamiento del estudio de taludes vulnerables a lo largo del tramo de Santa Inés – Huancavelica se realizará de acuerdo al siguiente flujograma:

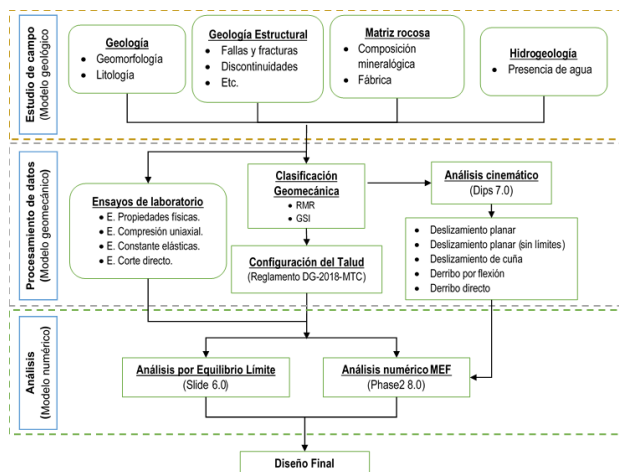


Fig. 2. Diagrama de flujo de la metodología para la evaluación de la estabilidad del talud rocoso. Fuente: Adaptado de Open Pit Slope Design [17].

Para el estudio de campo se hará uso de la información proporcionado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), el cual nos permitirá tener una información preliminar para la salida a campo y así mismo elaborar el modelo geológico describiendo la geomorfología y litología del macizo rocoso. Una vez obtenido los datos en campo según las pautas de la clasificación geomecánica de Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski 1976 [20], y el Índice de resistencia geológica (GSI) de Hoek-Brown se procedió a realizar los ensayos de laboratorio de acuerdo a la normativa de American Society for Testing and materials (ASTM) y “international Unión of Geological Sciences” para realizar el análisis petrográfico. Antes de realizar el análisis numérico se realizó el análisis cinemático de las discontinuidades predominantes mediante el programa Dips y así tener como dato de entrada. Finalmente se llega analizar los taludes por el método de elementos finitos y equilibrio límite mediante el software Phase2 y slide de Rocscience.

4.1. MODELO NUMÉRICO

La técnica de modelado numérico se utiliza ampliamente para resolver diversos problemas relacionados con proyectos de ingeniería geotécnica. La rápida progresión en la eficiencia computacional permitió a los investigadores comprender la respuesta geomecánica del material formado de pendientes bajo cargas estáticas y dinámicas. En un sentido más amplio, los métodos numéricos se pueden clasificar en modelos continuos, discontinuos e híbridos [5]. El modelo continuo puede aplicarse a aquellos taludes de roca en los que la masa rocosa es relativamente uniforme, en la modelización del modelo continuo se basan los métodos de elementos finitos, diferencias finitas y elementos de contorno [21]. El modelo discontinuo es adecuado para masas rocosas discontinuas que contienen discontinuidades y el mecanismo de fallo está controlado por las discontinuidades preexistentes [22].

Y el enfoque de la modelización híbrida utiliza las capacidades combinadas de los métodos continuos y discontinuos, la geometría compleja de la pendiente y la discontinuidad pueden adaptarse de mejor manera en este modelado [22].

4.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

El modelo de elementos finitos es un método elastoplástico ampliamente aceptado en el área de investigación geotécnica. No requiere ninguna suposición previa para la ubicación de la superficie de deslizamiento y los resultados son de naturaleza no lineal e iterativa [23]. Para la evaluación de la estabilidad de taludes mediante este método el factor de seguridad aplicado es mediante la reducción de la resistencia al corte (SSR), al cual se han realizado gran número de simulaciones [24], donde la resistencia del material se reduce durante las iteraciones hasta producirse la falla.

4.3. CRITERIO DE FALLA DEL MACIZO ROCOSO

En macizos rocosos muy fracturados, la superficie de falla es principalmente a lo largo de las discontinuidades y parcialmente a través de la roca intacta. Existen diferentes criterios de falla principales y ampliamente utilizados para el modelado numérico de macizos rocosos como son el criterio Mohr Coulomb (MC), Hoek-Brown (HB), Drucker-Prager, Generalized Hoek-Brown (GHB), Cam-Clay, Modified Cam-Clay y Discrete Function. A diferencia del criterio MC, GHB es un criterio derivado empíricamente que se basa en el aumento no lineal del esfuerzo cortante pico con la presión de confinamiento [25].

El criterio generalizado de Hoek-Brown, introducido por Hoek en 1994, el cual se encuentra en constante actualización [26], nos permite clarificar algunas incertidumbres e inexactitudes de los valores del macizo rocoso de manera práctica de acuerdo a las observaciones y datos de laboratorio. El criterio GHB se expresa en términos de los esfuerzos principales mayores y menores, mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \dots(1)$$

Donde m_b , s y a son las constantes del material del macizo rocoso.

Según Hoek & Diederichs [27] propuso una relación empírica para calcular el módulo de deformación E_{rm} del macizo rocoso. Se designa como criterio generalizado de Hoek-Diederichs representado mediante la siguiente ecuación:

$$E_{rm} = E_i \left\{ 0.02 + \frac{1 - (D/2)}{1 + e \frac{(60+15D-GSI)}{11}} \right\} \dots(2)$$

Dónde E_i es el módulo de elasticidad de la roca intacta y D es el factor de disturbancia o perturbación de la roca

causado por la voladura y GSI es cuál es el índice de resistencia geológica.

4.4. CRITERIO DE FALLA DE LAS JUNTAS

La resistencia al corte a lo largo de dichos planos de discontinuidades principalmente depende de la forma y rugosidad de las asperezas, el grado de alteración, la persistencia, el espesor y tipo del material de relleno. El modelo más conocido para estimar la resistencia al corte de las discontinuidades es el criterio de MC:

$$\tau_f = c_j + \sigma_n \tan \varphi_j \quad \dots(3)$$

Donde τ_f es resistencia al corte en caso de falla, c_j es la cohesión de las juntas σ_n esfuerzo normal efectivo y φ_j es el ángulo de fricción de las juntas.

Sin embargo, este criterio tiene ciertas limitaciones debido a que se considera que la envolvente de falla es lineal, además las muestras o testigos deben ser obtenidas en campo necesariamente mediante una perforación diamantina para distinguir las discontinuidades. Debido ante esta necesidad Barton y Choubey [28] y [29] proponen una ecuación donde se integra valores que se pueden estimar en campo como la rugosidad que contribuye significativamente en el comportamiento no lineal del macizo rocoso entre el esfuerzo normal (σ_n) y el esfuerzo de tensiones (τ_f), tal como muestra [30] bajo distintas condiciones en roca intacta y discontinuidades.

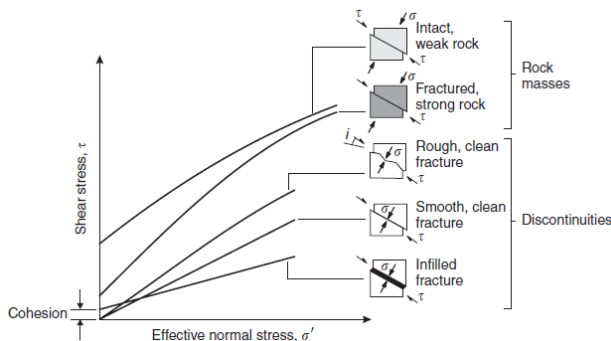


Fig. 3 Relación entre la tensión y esfuerzo efectivo normal en macizos rocosos y en tres tipos de discontinuidades, [31].

A través, de muchas actualizaciones el criterio de resistencia al corte de Barton y Choubey se puede expresar como:

$$\tau_f = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad \dots(4)$$

Donde φ_b es el ángulo de fricción básico sobre una superficie no meteorizada, JRC es el coeficiente de rugosidad de la junta y JCS es la resistencia a la compresión de la pared de la junta el cual se puede estimar mediante la Norma de ASTM.

La rigidez de las juntas de las rocas define la deformación bajo cargas tanto normales como tangenciales. La rigidez normal puede definirse como el

esfuerzo normal por unidad de cierre de la junta, mientras que la rigidez de corte de una junta es la relación entre el esfuerzo cortante máximo y el desplazamiento cortante [32].

La rigidez normal de la articulación se representa como:

$$K_n = \frac{E_i E_m}{L(E_i - E_m)} \quad \dots(5)$$

Donde K_n es la rigidez normal de las juntas, E_m es el módulo de la masa rocosa, E_i es el módulo de roca intacta y L es el espaciado medio de las juntas.

La rigidez de corte de la junta se representa como:

$$K_s = \frac{G_i G_m}{L(G_i - G_m)} \quad \dots(6)$$

Donde K_s es la rigidez cortante de las juntas, G_m es el módulo de corte del macizo rocoso, G_i es el módulo de corte de la roca intacta.

5. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES SANTA INÉS – HUANCAMELICA

En el presente estudio, la evaluación de la estabilidad de taludes rocosos se llevó a cabo combinando varios parámetros e integrando una variedad de información del campo geotécnico y las investigaciones de laboratorio. Durante las etapas de la investigación, se realizó un estudio de campo inicial donde se ha demarcado 7 sectores de taludes de corte potenciales a deslizamiento para realizar una evaluación geotécnica detallada.

5.1. UNIDAD LITOLÓGICA Y ESTRUCTURAL DEL MACIZO ROCOSO

De acuerdo al mapeo litológico de la región de Huancavelica elaborado por el INGEMMET, a escala de 1:50 000 en su última actualización en el año 2003 [15], se describe las unidades litológicas de interés de los sectores de análisis (Tabla I). La elaboración de esta cartografía está condicionada por las asociaciones de diferentes tipos de rocas agrupadas en formaciones geológicas, las cuales se detallan a continuación:

- Las Formación Auquilca (Ts-au), Sacsaquero (Tm-ss) y Castrovirreyna (Ts-c), se clasifica como rocas volcano-sedimentarias, conformado por tobas y brechas basálticas, lavas y tobas andesíticas intercaladas con arenisca, limolita, lutitas, conglomerados y calizas.
- La Formación Tantara (Ti-t), se clasifica como roca volcánica, conformado por secuencia de lavas.
- La Formación Casapalca (Ts-ca), se clasifica como roca sedimentaria conformado por conglomerados, areniscas, lodolitas, limoarcillitas y lutitas.

A continuación (Fig. 3), se muestra una imagen satelital y la fotografía de campo donde se observa el estado actual de los taludes.

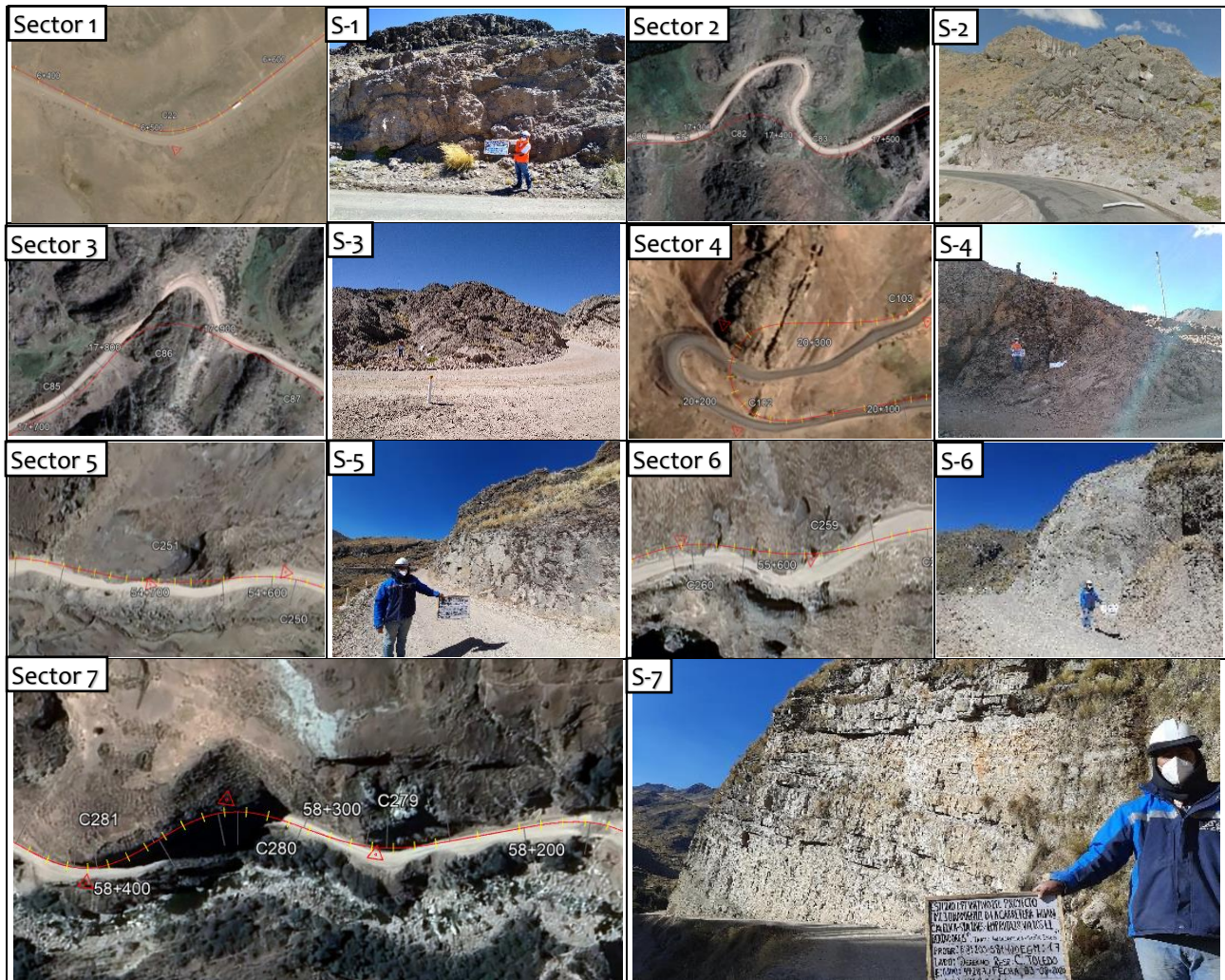


Fig. 4 Fotografía satelital y de campo, donde se muestra el estado actual de los taludes del tramo Santa Inés - Huancavelica.

Los sectores de análisis presentan diferentes estructuras geológicas en su mayoría una estructura anisotrópica y un conjunto de familias de las discontinuidades.

- El sector 1 presenta dos tipos de estratos, el estrato superior presenta un espesor variable, bloques fracturados en forma columnar de altura variable, mientras el estrato inferior presenta una degradación a suelo residual. Los posibles problemas geotécnicos son roturas de vuelco, desprendimiento, filtraciones y alteraciones como se ha observado en campo un macizo rocoso altamente meteorizado.
- El sector 2 y 3 son cercanos sin embargo presentan distintas estructuras geológicas, el S2 presenta planos de estratificación horizontales continuas. El S3 presente planos de estratificación y fracturas con buzamientos característicos de una falla en cuña (Fig. 3-S3).
- El sector 4 presenta una falla local y fracturas, con superficies poco continuas con posibles roturas y caída de bloques sueltos.
- Los sectores 5 y 6 son cercanos, pero poseen distintas estructuras geológicas, el S5 presenta planos de estratificación vertical en forma tabular a diferencia del S6 presenta algunas fracturas.
- El sector 7 presenta planos de estratificación de gran continuidad, poca separación como se puede apreciar en la (Fig. 3-S7). Los posibles problemas geotécnicos son roturas por vuelco directo debido a la orientación de las superficies.

TABLA I
Litología y formación geológica de los sectores de taludes.

Sector	Progresiva (Km)	Litología (Composición)	Formación
S1	6+530.00	Roca volcano-sedimentarias (Porfírica)	Ts-au
S2	17+350.00	Roca volcano-sedimentarias (Porfírica)	Tm-ss
S3	17+840.00	Roca volcano-sedimentarias (porfírica)	Tm-ss
S4	20+240.00	Roca volcánica (Derrames andesíticos)	Ti-t
S5	54+690.00	Roca ígnea volcánica (porfírica)	Ts-ca
S6	55+610.00	Roca ígnea volcánica (porfírica)	Ts-ca
S7	58+260.00	Roca sedimentaria	Ts-c

Nota: Según el análisis petrológico se ha identificado su composición mineralógica de cada sector.

Los efectos de los procesos geológicos relacionados con el agua y su incidencia geotécnica se han presentado en el sector 1, 4 y 7 donde se ha podido observar alteraciones en sus propiedades físicas y químicas. Estos sectores presentan cambios en su coloración y el grado de fracturamiento, además se ha podido observar que los macizos rocosos se encuentran de moderada a alta meteorización.

5.2. CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Para la caracterización del macizo rocoso se han determinado a partir de las investigaciones de campo y del laboratorio. La caracterización del macizo rocoso se realizó mediante el GSI de Hoek-Brown, cada sector se representó en la tabla del GSI (Fig. 6) y se han estimado los valores de los 7 sectores de análisis (Tabla II).

En el laboratorio de mecánica de rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería, se ha determinado la resistencia compresión uniaxial (ASTM D2938-95), el ensayo de constantes elásticas (ASTM D7012-04), el ensayo de propiedades físicas (ASTM D2216-02) las cuales se muestran a continuación.

TABLA II
Datos geomecánicos para la caracterización de la matriz rocosa

Sector	UCS (MPa)	GSI	D	mi	Peso específico (MN/m ³)	Relación de Poisson (ν)	Modelo de Young E (GPa)
S1	57.4	40	0.85	17	0.0213	0.28	10.08
S2	61.7	35	0.85	17	0.0253	0.32	5.04
S3	61.7	40	0.8	17	0.0253	0.32	5.04
S4	50.9	35	0.9	10	0.0248	0.31	5.39
S5	138.8	50	0.85	17	0.0245	0.23	17.57
S6	138.8	55	0.7	17	0.0245	0.23	17.57
S7	133.6	30	0.9	10	0.0259	0.24	16.25

Para la caracterización de la matriz rocosa se hará uso los valores obtenidos en laboratorio, así como, la estimación de parámetros geomecánicos según el criterio GHB como el valor del índice de resistencia geológica, factor de disturbancia y la constante de la roca intacta las cuales también se muestran a continuación.

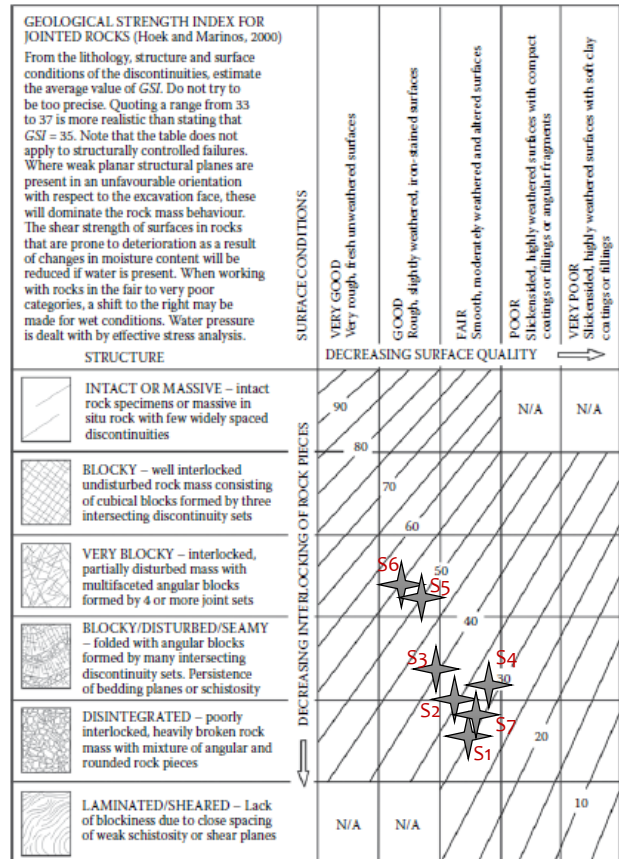


Fig. 5 Valores del GSI de los taludes investigados a lo largo del tramo Santa Inés - Huancavelica.

5.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

Por otro lado, la resistencia al corte en las discontinuidades depende en gran medida de la rugosidad o asperezas de la pared de la junta. A lo largo del tramo los taludes presentan planos medianamente rugosos a rugosos y una ondulación de plana a poco ondulada. Para determinar los valores del JRC, las superficies estimadas en campo se han comparado con los perfiles estándar propuestos por [29] y para determinar el ángulo de fricción del macizo se ha realizado el ensayo de corte directo (ASTM D5607-95).

Además, según [33] indica que para una discontinuidad inalterada, JCS es igual a la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) de la roca, mientras que para discontinuidades alteradas, JCS puede ser considerado como $\frac{1}{4}$ de (σ_c). Debido a la incertidumbre se asume los valores del ensayo de compresión uniaxial y constantes elásticas.

TABLA III
Valores de ángulo de fricción residual, coeficiente de rugosidad y la resistencia uniaxial de las discontinuidades.

Sector	Joint	Ángulo de fricción (°)	JRC	JCS
S1	J1	27.08	10	14.35
	J2		8	14.35
S2	J1	27.65	6	15.43
S3	J1	27.65	6	15.43
	J2		12	
S4	J1	27.08	8	12.73
S5	J1	28.06	7	34.70
S6	J2		8	
	J*	28.06	12	69.40
S7	J1	27.71	2.8	33.40
S1	J1	27.08	10	14.35
	J2		8	14.35

Para obtener los valores de las rigideces de las discontinuidades se determina a partir de los valores obtenidos y estimados de la (Tabla II). El módulo del macizo rocoso ha sido determinado según la ecuación (4), propuesto por Hoek-Diederichs. El espaciado de juntas es la distancia perpendicular entre dos juntas en un conjunto particular. La rigidez normal y de corte han sido determinados por la ecuación (5) y (6) respectivamente.

TABLA IV
Datos geomecánicas de las discontinuidades para la modelación numérica.

Sector	Joint	E_m (MPa)	E_{rm} (MPa)	L (m)	K_n (MPa/m)	K_s (MPa/m)
	J2		305.87	1	506.75	50.67
S2	J1	5040	191.55	1.5	132.75	13.27
S3	J1	5040	257.16	1	270.99	27.10
	J2			2	135.49	13.55
S4	J1	5390	194.70	2	101.00	10.10
S5	J1	17570	1485.21	0.8	2027.94	202.79
	J2			1	1622.35	162.24
S6	J*	17570	2594.13	2	1521.74	152.17
S7	J1	16250	493.09	0.5	1017.03	101.70

Nota: *El sector 06 no tiene una discontinuidad predominante sin embargo todo macizo rocoso presenta fracturas.

Diferentes autores como [34], [4] y [35] entre otros investigadores consideran como rigidez normal y de corte los valores típicos de 100GPa/m y 10GPa/m respectivamente cada sector de análisis. Sin embargo, estos valores difieren con esta investigación debido a que cada sector posee diferentes propiedades geomecánicas y estructurales.

5.4. ANÁLISIS CINEMÁTICO

Este análisis ha sido desarrollado mediante el software Dips, con los datos obtenidos en campo para definir las familias de las discontinuidades predominantes en el macizo rocoso, así mismo, para determinar el mecanismo de falla. Durante el análisis se llegó a representar la dirección de buzamiento y buzamiento de las familias predominantes de los sectores de análisis, los cuales son como dato de entrada para el modelado numérico.

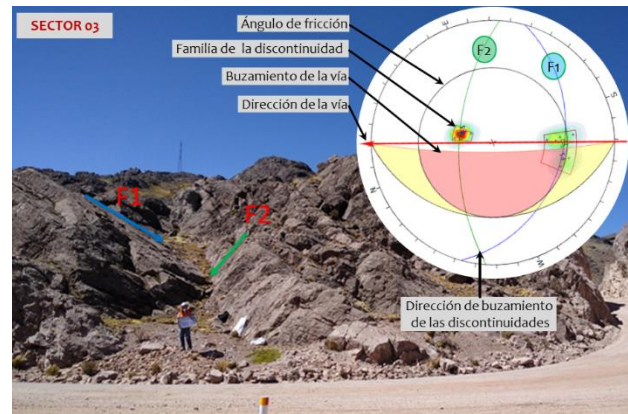


Fig. 6 Análisis cinemático del sector 03, donde se muestra la representación estereográfica en el Dips las discontinuidades.

De los sectores de análisis se han identificado una a dos familias de discontinuidades predominantes, sin embargo, en el sector 6 solo se tiene algunas fracturas ocasionales. A continuación, se presenta las principales discontinuidades de los sectores de análisis.

TABLA V
Orientación del talud de la vía y de las discontinuidades

Sector	Talud de la vía		Discontinuidades		
	Dips	Dip Direction	Joint	Dips	Dip Direction
S1	76	78	J1	86	119
			J2	80	43
S2	81	328	J1	28	171
			J2	82	265
S3	291	291	J1	81	125
			J2	82	265
S4	81	105	J1	85	53
			J2	71	282
S5	81	326	J1	83	354
S6	No tiene familia de discontinuidades bien definidas.				
S7	76	304	J1	19	214

5.5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MEDIANTE MEF Y MEL

Para el análisis mediante el método de elementos finitos se ha utilizado el software Phase2, donde se ha considerado 500 iteraciones máximas con tolerancia de 0.001, en condiciones bajo cargas por gravedad y la discretización con triángulos de 3 nodos. Adicionalmente se ha empleado el criterio de GHB no lineal para el modelado de la matriz rocosa, mientras para las discontinuidades el criterio Barton-Bandis.

Para cada sección de análisis se han restringido y liberado los desplazamientos, para la parte inferior se ha colocado como apoyos fijos, en el eje "Y" exterior se ha combinado los desplazamientos tanto como apoyos móviles y fijos y la parte superior en contacto con la superficie se ha liberado.

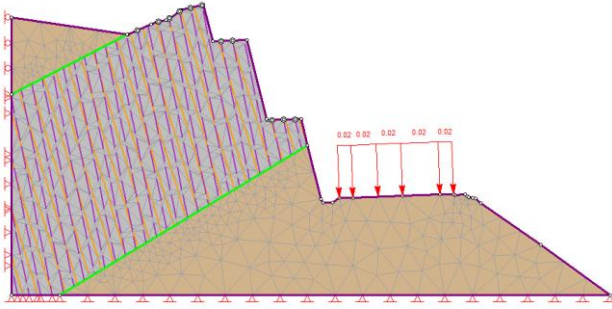


Fig. 7 Caracterización del sector 01 en el software Phase2 para el análisis numérico mediante elementos finitos.

Según [36], [4] y [37] nos muestran diferentes caracterizaciones de las discontinuidades del macizo rocoso en el modelado numérico como “Parallel Deterministic y Statistical” para discontinuidades de mayor y menor persistencia, “Cross Jointed” para macizos con formaciones tubulares o columnares y “Voronoi” para rocas conglomerados, este último no se ha utilizado para la caracterización de los sectores del tramo de Santa Inés – Huancavelica. Por último [34] nos muestra la caracterización de “Baecher y Veneziano” para rocas fracturadas con orientaciones muy variadas o rocas poco fracturadas, esta caracterización se ha empleado para el sector 6 debido a que no se tenía discontinuidades bien definidas y se observaba algunas fracturas.

Para el análisis por el método de equilibrio límite mediante el software Slide se ha generado estratos por la meteorización, el grado de fracturamiento y la perturbación principalmente. Se ha asumido el criterio

de Spencer por los valores conservadores. El análisis se ha considerado como superficie no circular y el mecanismo de búsqueda trazado (Path Search) el cual genera superficies deslizantes aleatorias, además, se ha considerado un máximo de 1000 superficies de análisis.

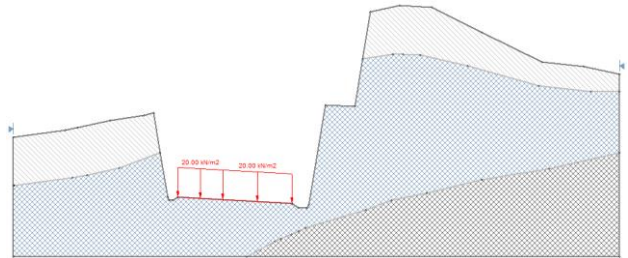


Fig. 8 Caracterización del sector 02 en el software Slide para el análisis mediante equilibrio límite.

Los análisis cinemáticos presentados se han desarrollado de acuerdo a las mediciones en campo mediante la brújula con clinómetro, las cuales representan a las principales superficies de discontinuidades con sus probabilidades de falla (PF) y del mecanismo de falla más crítico.

Cabe mencionar que, de acuerdo al estudio de peligro sísmico, el coeficiente sísmico horizontal será para un tiempo de retorno de 475 años por recomendación de [38], el cual es de 0.206g. Además, las configuraciones de los taludes presentados corresponden según las recomendaciones del manual del diseño geométrico de carreteras del MTC [39].

En el siguiente cuadro se muestra los resultados de los análisis.

Sect.	MEF (Phase2 v.8)	MEL (Slide v.6)	Análisis cinemático (DIPS v.7)
Sector 01			
Sector 02			
Sector 03			

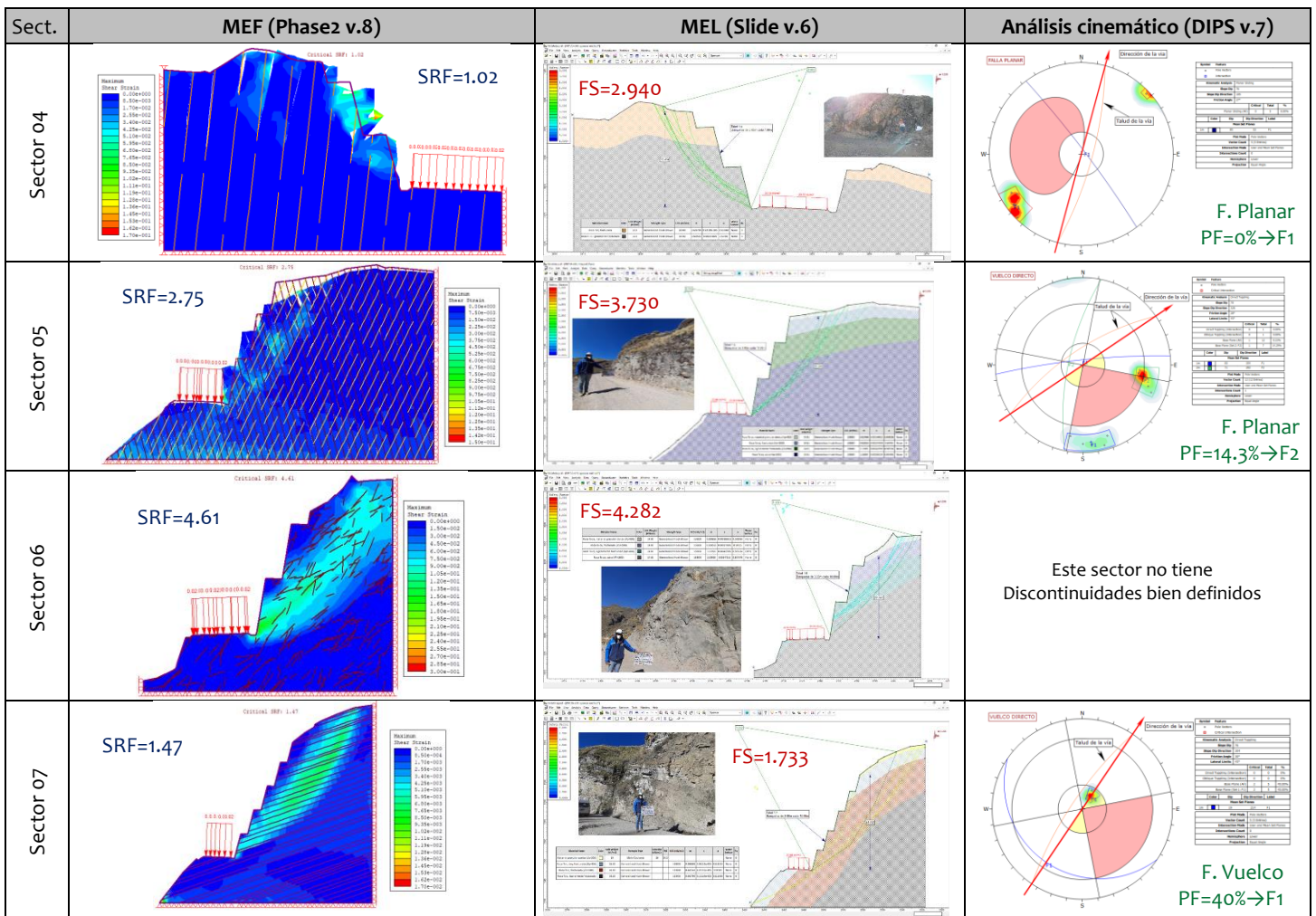


Fig. 9 Análisis de los sectores mediante el método de elementos finitos, equilibrio límite y el análisis cinemático.

En la modelación y caracterización de cada sector en el software Phase2 nos ha permitido representar de manera explícita las discontinuidades las cuales son predominantes en taludes de menor altura, mientras en el software Slide se ha tratado de generar estratos a la cual se pueda colocar características y condiciones diferentes a las que están expuestas tanto en superficie y a profundidad el macizo rocoso.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La evaluación de cada sector presentados en la Fig. 8, mediante MEL y MEF ha sido analizado en condición pseudoestático (con cargas sísmicas) llevando cada modelo a situaciones críticas de inestabilidad. Para está condición se considera que el factor de seguridad mínimo sea 1.1.

A continuación, se muestra los resultados del factor de seguridad y el grado de estabilidad de los taludes en análisis.

TABLA VI
Grado de estabilidad, factor de seguridad mediante MEL y SRF en MEF

Sector	SRF por criterio GHB (MEF)		FS por criterio GHB (MEL)	
	Valor	Grado de estabilidad	Valor	Grado de estabilidad
S1	1.37	Estable	2.709	Estable
S2	1.75	Estable	3.106	Estable
S3	1.39	Estable	3.098	Estable
S4	1.02	Inestable	2.940	Estable
S5	2.75	Estable	3.730	Estable
S6	4.61	Estable	4.282	Estable
S7	1.47	Estable	1.733	Estable

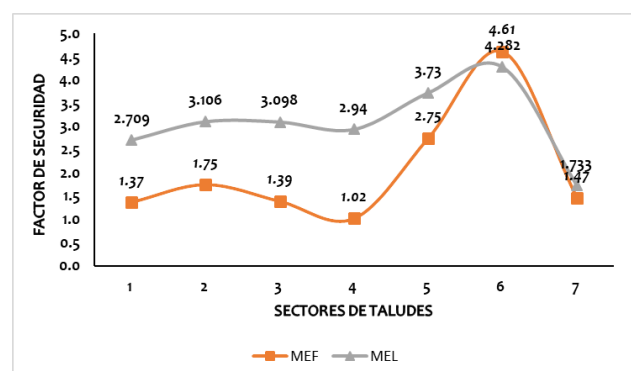


Fig. 10, Representación gráfica de los resultados determinados mediante MEF y MEL.

En la Fig. 9 se puede observar la variación significativa del factor de seguridad entre ambos métodos, donde el método de elementos finitos presenta valores menores y cercanos a la unidad por los 4 primeros y el último sector. Sin embargo, los sectores 5 y 6 presentan valores cercanos entre ambos métodos, esto debido a que estos dos últimos sectores poseen buenas condiciones geomecánicas.

El comportamiento de taludes de menor altura mediante el MEF varía exponencialmente por las condiciones estructurales (discontinuidades) que presenta, ya que en el sector 6 el modelo presenta fracturas en poca cantidad, con diferentes orientaciones y persistencias permitiendo que el macizo rocoso no tenga superficies desfavorables donde se pueda producir roturas y/o fallas.

El sector 4 tiene un factor de seguridad de 1.02 por el método de elementos finitos y 2.940 por el método de equilibrio límite, se puede notar que existe una diferencia de 1.92 que supera en 65.31% respecto al MEF. Se infiere que el método de MEF presenta valores muy conservadores frente al MEL.

El método de elementos finitos nos muestra las tensiones al que está sometido el macizo rocoso, los cuales podemos distinguir según el cambio de colores que presenta la sección de análisis.

Las superficies de falla que presenta el sector 2 y 4 mediante el MEF son deformaciones superficiales a la última banqueta respecto a la superficie de corte a diferencia por el MEL el trazo de la línea de falla pasa a mayor profundidad y por lo general termina al pie del talud. Además, difiere con las investigaciones realizadas por Lojano y Vintimilla los cuales concluyen que los factores y la superficie de falla son similares.

La tendencia que existe en los valores del factor de seguridad frente a las condiciones geomecánicas y estructurales del macizo rocoso en el análisis mediante el MEF y MEL son similares, ya que se puede notar que cuando el sector posea buenas condiciones el factor de seguridad aumenta por tanto el factor de seguridad es inversamente proporcional a las condiciones que presenta el macizo rocoso.

CONCLUSIÓN

- La clasificación geomecánica mediante el RMR de Bieniawski y el GSI de Hoek-Brown son indispensables para realizar el reconocimiento de las condiciones y características que presenta el macizo rocoso en campo.
- Determinar las propiedades físicas y estimar los parámetros geomecánicos del macizo rocoso mediante los ensayos de laboratorio y los criterios de caracterización del macizo rocoso nos ha permitido construir un modelo al que, pueda ser analizado mediante el método de elementos finitos y el método de equilibrio límite.
- La evaluación de la estabilidad de taludes mediante el método de elementos finitos nos permite tener

una mayor información y una visión clara el comportamiento que tiene el macizo rocoso según sus condiciones geomecánicas y estructurales.

- Mediante el análisis numérico se concluye que para taludes de menor altura las discontinuidades son condicionantes en su estabilidad, mientras para taludes de gran altura se aplica el efecto escala en donde el modelo se comporta como un material homogéneo y las discontinuidades no condicionan su estabilidad tal es el caso del sector 7 y por lo general la rotura se produce en forma circular.
- De acuerdo a los análisis obtenidos mediante el MEF y MEL el factor de seguridad es inversamente proporcional a las condiciones geomecánicas y estructurales de los macizos rocosos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, mis seres queridos, Ing Ferrer Canaza Rojas y al Ing Carlos Toledo Durán.

REFERENCIAS

- [1] R. Torres-Hoyer, J. Torres-Hoyer, and M. Laura Monsalve, "Análisis de estabilidad cuasi-tridimensional de un talud de suelo empleando el método de elementos finitos: Autopista San Cristóbal – La Fría, Venezuela," *Rev. Cienc. e Ing.*, vol. 34, no. 2, pp. 63–72, 2013.
- [2] K. Grattz, J. Salazar, and C. Rodríguez, "Análisis de los factores que determinan el diseño de mallas metálicas para la estabilización de taludes en macizos rocosos Analysis of the factors that determine the wire mesh design for the stabilization of rock slopes Introducción de taludes en roca," pp. 25–38, 2018.
- [3] R. E. Hammah, T. E. Yacoub, B. Corkum, and J. H. Curran, "A comparison of Finite Element Slope Stability analysis with conventional Limit-Equilibrium Investigation," *Proc. 58th Can. Geotech. 6th Jt. IAH-CNC CGS Groundw. Spec. Conf.*, p. 8, 2005.
- [4] R. E. Hammah, T. Yacoub, B. Corkum, and J. H. Curran, "The Practical Modelling of Discontinuous Rock Masses with Finite Element Analysis," *Am. Rock Mech. Assoc.*, vol. 8, 2008.
- [5] S. Prasad and T. Siddique, "Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Stability assessment of landslide-prone road cut rock slopes in Himalayan terrain : A finite element method based approach," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 59–73, 2020.
- [6] L. Jing and J. A. Hudson, "Numerical methods in rock mechanics," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 39, no. 4, pp. 409–427, 2002.
- [7] L. Jing, "A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 40, no. 3, pp. 283–353,

- 2003.
- [8] Z. Meng *et al.*, “Discrete Element Simulation Analysis of the Bending and Toppling Failure Mechanisms of High Rock Slopes,” *Geofluids*, vol. 2021, 2021.
- [9] N. Barton, “Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions,” *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 249–261, 2013.
- [10] R. Pozo, “Análisis numérico del mecanismo de falla en macizos rocosos fracturados considerando el efecto escala,” 2014.
- [11] J. Lojano, “Análisis de la estabilidad global del talud izquierdo del cuenco amortiguador de la presa Mazar,” 2010.
- [12] C. Vintimilla, “Análisis de la estabilidad del cerro shishio mediante el empleo de técnicas numéricas,” 2011.
- [13] F. Valeriano, “Análisis de Estabilidad Probabilístico del Talud de la Cantera Espinal – Juliaca,” *Rev. ECIPeru*, pp. 39–43, 2014.
- [14] D. Moses, H. Shimada, T. Sasaoka, A. Hamanaka, T. K. Dintwe, and S. Wahyudi, “Rock Slope Stability Analysis by Using Integrated Approach,” *World J. Eng. Technol.*, vol. 08, no. 03, pp. 405–428, 2020.
- [15] M. Vilchez Mata, M. Ochoa Zubieta, and W. Pari Pinto, *Peligro Geológico en la Región Huancavelica*, vol. 69, no. 11, 2019.
- [16] M. Vilchez and M. Ochoa, “Zonas críticas por peligros geológicos en la Región Huancavelica,” *Ingemmet*, vol. 6, no. August, p. 128, 2016.
- [17] J. Read and P. Stacey, *Guidelines for open pit slope design*, CSIRO, Collingwood, Australia, 2010.
- [18] L. I. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, and C. Oteo, “Ingeniería geológica,” 2002.
- [19] L. I. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, and C. Oteo, *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Prentice Hall, 2002.
- [20] Osinergmin, *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. 2017.
- [21] T. K. Raghuvanshi, “Journal of King Saud University – Science Plane failure in rock slopes – A review on stability analysis techniques,” *J. King Saud Univ. - Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 101–109, 2019.
- [22] D. Stead, E. Eberhardt, and J. S. Coggan, “Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques,” vol. 83, pp. 217–235, 2006.
- [23] D. V. Griffiths and P. A. Lane, “Slope stability analysis by finite elements,” no. 3, pp. 387–403, 2013.
- [24] T. Matsui and K. C. San, “Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique,” *Soils Found.*, vol. 32, no. 1, pp. 59–70, 1992.
- [25] E. Eberhardt, “The Hoek – Brown Failure Criterion,” pp. 981–988, 2012.
- [26] E. Hoek and E. T. Brown, “The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition,” *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 445–463, 2019.
- [27] E. Hoek and M. S. Diederichs, “Empirical estimation of rock mass modulus,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 43, no. 2, pp. 203–215, 2006.
- [28] N. Barton, “Review of a new shear-strength criterion for rock joints,” *Eng. Geol.*, vol. 7, no. 4, pp. 287–332, 1973.
- [29] N. Barton and V. Choubey, “Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice.,” *Rock Mech. Felsmechanik*, vol. 10, no. 119, 1978.
- [30] D. Wyllie and C. Mah, *Rock Slope Engineering Civil and Mining*, 4th ed. London and New York: Spon Press Taylor & Francis Group, 2004.
- [31] G. F. Wieczorek, “Landslides: investigation and mitigation. Chapter 4-Landslide triggering mechanisms,” *Transp. Res. Board Spec. Rep.*, no. 247, 1996.
- [32] N. R. Barton, “A model study of rock-joint deformation,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 9, no. 5, pp. 579–582, 1972.
- [33] J. Gavilanes, “Introducción a la ingeniería de túneles, caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosos,” 2004.
- [34] S. Moallemi, J. H. Curran, and T. Yacoub, “On modeling rock slope stability using XFEM,” 2nd *Int. Discret. Fract. Netw. Eng. Conf. DFNE 2018*, no. October, 2018.
- [35] A. Riahi and J. H. Curran, “Application of cosserat continuum approach in the finite element shear strength reduction analysis of jointed rock slopes,” 12th *Int. Conf. Comput. Methods Adv. Geomech. 2008*, vol. 1, no. 1993, pp. 110–118, 2008.
- [36] R. E. Hammah and T. Yacoub, “Variation of Failure Mechanisms of Slopes in Jointed Rock Masses with Changing Scale,” *Civ. Eng.*, 2007.
- [37] R. Hammah, T. E. Yacoub, and J. H. Curran, “Numerical modelling of slope uncertainty due to rock mass jointing,” *Int. Conf. Rock Joints Jointed Rock Masses*, no. July, pp. 1–8, 2009.
- [38] R. F. Ballard Jr and T. H. Grau, “The US Army Corps of Engineers Seismic Strong-Motion Instrumentation Program,” *US Army Corps Eng.*, p. 118, 1998.
- [39] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, *Diseño Geométrico DG-2018*. 2018.