

# Analysis of Slope Stability in Rock Massifs Comparing the Limit Equilibrium Method and the Finite Element Method in the Unstable Sector from km 5+000 to km 5+250, of the San Miguel – Llapa , Province of San Miguel, Cajamarca

Kristian Fernando Heras Salazar, Bach.<sup>1</sup>, Reiner Ali Balcázar Rojas, Bach.<sup>1</sup> and Henry Josué Villanueva Bazán, Ing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú, N00024512@upn.edu.pe, N00016903@upn.edu.pe, henry.villanueva@upn.edu.pe

*The objective of this research is to carry out the analysis of slope stability in rock masses by comparing the limit equilibrium method and the finite element method in the unstable sector from km 5+000 to km 5+250, of the San Miguel – Llapa, province of San Miguel, Cajamarca. 04 rock slopes were evaluated, evaluating using the two methods and identifying their differences with respect to the estimation of the safety factors, in order to make a better choice when choosing between one analysis method and the other, for an efficient analysis. As a result of the analysis using the limit equilibrium method, safety factors lower than the minimum allowed were determined, varying from 0.991 to 1.278 in static conditions and from 0.798 to 1.030 in pseudo-static conditions, which indicates that the slopes present a constant risk of landslide and that require a reconfiguration of the geometry of the slopes. The finite element analysis gave a much less conservative result, the SRF varies from 2.50 to 3.25, not considering the main factor that triggers stability, which in this case would be the orientation of the discontinuities.*

**Keywords:** Stability, finite elements, limit equilibrium, security factor, Strength Factor.

## I. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de taludes en roca es una especialidad de gran importancia, desde el punto de vista económico y de seguridad a largo plazo, ya que dentro del diseño de una carretera uno de los factores más importantes a tener en cuenta es la identificación y evaluación de taludes inestables que puedan poner en riesgo las vías. Una de las principales diferencias para el análisis de estabilidad con respecto a la estabilidad en suelos es que las rocas no son homogéneas sino anisotrópicas, los parámetros de resistencia de las rocas son muy variables y difíciles de determinar con precisión [1].

Al estudiar los fenómenos de inestabilidades de taludes, es necesario identificar y caracterizar los distintos tipos de comportamiento, y clasificarlos adecuadamente. Un análisis preciso del tipo de rotura permite optimizar las medidas de contención. Por el contrario, una incorrecta definición del mecanismo de rotura puede dar lugar a soluciones incorrectas o ineficaces, y en algunos casos contraproducentes [2].

Internacionalmente, existen muchas formas de abordar el problema de la estabilidad de taludes, pero la mayoría tienen en común enfocarse en determinar un coeficiente o factor de seguridad, por ejemplo, en Europa, el Eurocódigo 7, contempla el método de los coeficientes parciales para el proyecto geotécnico, del mismo modo que, en Estados Unidos, la LRFD (Load and Resistance Factor Design) AASHTO enfoca los cálculos de ingeniería bajo este punto de vista [1].

Actualmente, existen varias normativas nacionales e internacionales ampliamente aceptadas en Perú, en las que se regula el coeficiente de seguridad a emplear. Para determinar este coeficiente, los métodos de cálculo se dividen en dos grandes grupos: métodos de equilibrio límite y métodos de elementos finitos (método numérico). Considerando la importancia de un buen análisis de estabilidad para evitar los graves daños que pueden ocasionar los procesos geológicos en la infraestructura existente, es que resulta fundamental realizar un correcto análisis de estabilidad de taludes que permita abordar estos problemas geodinámicos de manera eficiente [2].

Un correcto análisis de estabilidad de taludes permitiría que las actuales infraestructuras viales en nuestro país no presenten condiciones de riesgo. Algo que resulta fundamental ya que el desarrollo de la infraestructura vial constituye un aspecto importante en el crecimiento económico del país. En los países emergentes el desarrollo de la infraestructura vial constituye un pilar central para estimular la actividad económica, debido a que es una de las bases fundamentales sobre las que se apoyan todas las actividades privadas (tanto extractivas y productivas, como financieras y comerciales), posibilitando la existencia de mercados eficientes y la elevación de estándares de vida (Banco Mundial, 1994) [3].

En el Perú la situación de la infraestructura vial resulta precaria, según el IPE (2017) señala que el estado de las vías de la Red Vial Departamental y la Vecinal es muy pobre, con 86% y 92% de las vías aún no pavimentadas, respectivamente. Y si sumado a esto, consideramos que nuestro país debido a su variedad de climas, complejidad geológica y su ubicación en el denominado "Cinturón de Fuego del Pacífico", está expuesto a diversos peligros geológicos la situación se complica [4].

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

La justificación para realizar la presente investigación es aportar criterios de análisis para evaluar de manera eficiente la estabilidad de taludes rocosos, ya que como se menciona líneas arriba los procesos geodinámicos a los que se encuentra expuesto nuestro país, por sus mismas características geológicas y geográficas, da lugar a que constantemente tengamos que afrontar y plantear medidas de contención adecuadas para mantener en buen estado las vías de acceso. Para el caso específico de la Carretera San Miguel – Llapa, esta es la vía principal que conecta el Distrito de Llapa con la capital de Provincia San Miguel, se identificó que en el tramo del Km 5+000 al Km 5+250 se evidencian taludes altamente fracturados, lo cual constituye un riesgo constante para los usuarios que transitan la vía. Sumado al elevado grado de fracturamiento de los taludes superiores, se evidencia un proceso de socavamiento del lado derecho de la vía, lo cual disminuye el ancho transitable que en su sector más crítico llega a 3.60 metros de ancho de vía. Como medida de contención probable se necesitaría alejar la vía de la zona socavada, por lo que realizar los cortes necesarios en el talud superior constituyen una alternativa altamente posible que permitiría también recuperar el ancho transitable de la vía [n].

Para evaluar el estado de los taludes superiores conformados por macizos rocosos se requiere realizar el análisis de estabilidad [5].

Dada la incertidumbre que muchas veces existe respecto a los métodos de análisis de estabilidad de taludes es que se realizó la presente investigación, que consiste en una comparación entre los métodos de equilibrio límite y elementos finitos, identificando sus diferencias con respecto a las condiciones de aplicabilidad y la estimación de los factores de seguridad, que en ciertas ocasiones resultan muy diferentes y hasta contradictorias, para de esta manera tomar una mejor elección al momento de elegir entre uno y otro método, a fin de lograr un análisis eficiente [6].

A continuación, se presenta la definición de algunos términos básicos que se relacionan directamente con la investigación:

**Taludes:** Se entiende por taludes a las superficies inclinadas respecto de la horizontal generadas para la construcción de obras de infraestructura lineal (carreteras y ferrocarriles), canales, conducciones, exploraciones mineras, y en general cualquier construcción que requiera una superficie plana en una zona de pendiente, o hasta alcanzar una profundidad determinada por debajo de la superficie. Si la superficie del terreno no es horizontal, una componente de la gravedad ocasionará que el material que lo conforma se mueva hacia abajo [5].

**Estabilidad de Taludes Rocosos:** Para evaluar la estabilidad en macizos rocosos es necesario evaluar las características que estos presentan, es por ello que se recurre a clasificaciones geomecánicas. Las clasificaciones geomecánicas a través de las observaciones de las

características del macizo rocoso y ensayos simples nos permite determinar los índices de calidad de roca, estos están relacionados con los parámetros geo mecánicos del macizo rocoso y sus características frente al sostenimiento de taludes y túneles. Para el desarrollo de la presente investigación se ha tenido como base el análisis de las clasificaciones: RMR, SMR y GSI [6].

**Sistema de Clasificación RMR:** El sistema de clasificación Rock Mass Rating (RMR) es una referencia mundial para clasificar geomecánicamente el macizo rocoso. Desarrollado inicialmente por Bieniawski en 1973, posteriormente actualizado en 1989. Según Bieniawski (1989), menciona que los siguientes 6 parámetros son usados para clasificar la roca, usando el sistema RMR: Resistencia a la compresión simple, RQD, espaciamiento entre diaclasas, estado de las diaclasas, presencia de agua y orientación de las discontinuidades. La obtención de una puntuación de cada uno de ellos dará un valor del RMR que variará en un rango de 0 a 100 (Bieniawski, 1989) [7].

**Sistema de Clasificación SMR:** El sistema de clasificación Slope Mass Rating (SMR) se obtiene del índice RMR básico sumando un "factor de ajuste", que es función de la orientación de las juntas (y producto de tres sub factores) y un "factor de excavación" que depende del método utilizado (Romana, Serón & Montalar, 2012) [7].

**Sistema de Clasificación GSI:** El sistema de clasificación del Índice de Resistencia Geológica (GSI), fue desarrollado por Hoek y Brown en 1994, el cual introduce un nuevo índice de calidad geomecánica para los macizos rocosos, cuyo rango numérico está comprendido entre 0 y 100, se basa en estimaciones cualitativas (observación cuidadosa del macizo rocoso), por lo que no es necesario un trabajo de cálculo [8].

**Métodos para Análisis de Estabilidad de Taludes:** Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se pueden clasificar en dos grandes grupos: Métodos de equilibrio límite y método de elementos finitos [8].

**Métodos de equilibrio límite.** Los métodos de equilibrio límite (los más utilizados) analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendientes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. Para la obtención de los factores de seguridad de las inestabilidades encontradas en los taludes, se aplica el método de equilibrio límite, para condiciones estáticas como pseudo estáticas [8].

**Métodos de elementos finitos.** Los métodos de elementos finitos constituyen una alternativa a los métodos de equilibrio límite. Su principal ventaja es que consideran las relaciones tensión-deformación que sufre el material durante el proceso de deformación y rotura, siendo estas relaciones las que dan la pauta de su comportamiento y las que controlan su resistencia [9].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el análisis de estabilidad de taludes en macizos rocosos, se ha desarrollado un conjunto de técnicas, basadas en características cualitativas e índices numéricos que inciden en el comportamiento del macizo rocoso, presentes en los afloramientos. Los métodos propuestos por Bieniawski (1989), Romana (1985) y Hoek & Brown (1995) para obtener el RMR, SMR y GSI respectivamente, requieren de la determinación de parámetros básicos que involucran aspectos de campo y laboratorio.

El tipo de investigación es Cualitativa, puesto que se enfoca en comprender y profundizar los fenómenos, explorándolos desde la perspectiva de los participantes en un ambiente natural y en relación con el contexto, este método se propone evaluar, ponderar e interpretar la información obtenida a través de recursos como registros, memorias, entre otros, con el propósito de indagar en su significado profundo [10].

El nivel de esta investigación es descriptivo, ya que comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, composición o procesos de los fenómenos; por ende, permite describir las variables y contribuyendo a la explicación de dichas variables. Es no experimental ya que se realiza sin alterar deliberadamente las variables [10].

En cuanto a la población, para la presente investigación se consideró como población a los taludes de corte identificados a lo largo de los 250 m que abarca el sector inestable del Km 5+000 al Km 5+250. La muestra está conformada por 04 secciones de taludes ubicados dentro del sector inestable del Km 5+000 al Km 5+250, en los cuales se realizará el análisis de estabilidad bajo métodos de equilibrio límite y métodos de elementos finitos. Los criterios para la selección de estas 04 secciones a analizar fueron: a) Secciones cuyo talud superior presente mayor altura e inclinación y por tanto se consideren taludes críticos, b) Secciones conformadas principalmente por afloramientos rocosos altamente fracturados, ya que este análisis será aplicativo según criterios de mecánica de rocas.

La ubicación de los taludes considerados para la evaluación son los siguientes:

TABLA 1

UBICACIÓN DE TALUDES DE CORTE EVALUADOS Y NUMERACIÓN DE CELDA DE EVALUACIÓN GEOMECÁNICA.

Talud de corte en evaluación.	Celda de evaluación geomecánica
Km 05+140	01
Km 05+190	02
Km 05+200	03
Km 05+220	04

FUENTE: PROPIA

Para el desarrollo de la presente investigación se llevaron a cabo ensayos en campo y laboratorio, los cuales se describen a continuación:

Ensayos en Campo – in situ:

- Ensayo de Resistencia Compresión Simple con Martillo de Schmidt (ASTM D5873).

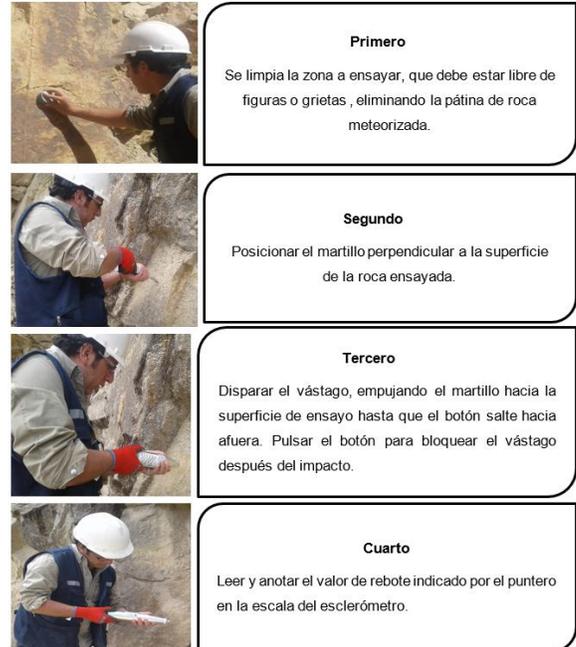


Fig. 1 Procedimiento de ejecución del ensayo de resistencia de Compresión Simple con Martillo de Schmidt. Fuente: Propia.

Ensayos de laboratorio:

- Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple.

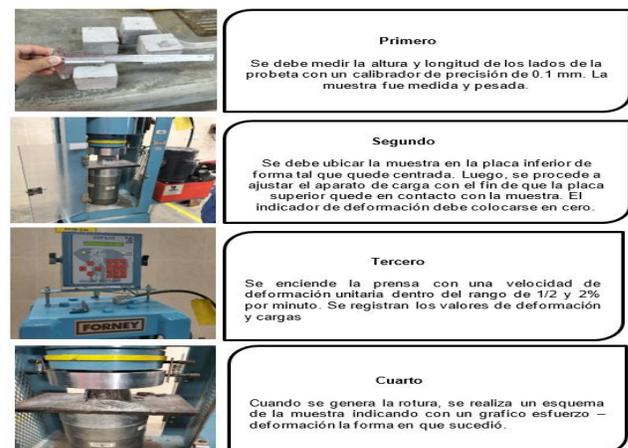


Fig. 2. Esquema de ejecución de ensayo de compresión uniaxial en laboratorio. Fuente: Propia.

Con respecto a las técnicas de recolección de datos, la principal técnica fue la observación directa en campo, con el objetivo de identificar las características que determinan la estabilidad de los taludes. Se realizó visitas de campo con la

finalidad de identificar aquellos taludes rocosos en los que se requiere analizar su grado de estabilidad debido al riesgo que generan.

Con respecto a los instrumentos, se utilizó para este estudio, protocolos de recolección de datos que comprende de cuadros, que se llenaron de acuerdo a los datos obtenidos de campo, para el caso de la resistencia a la compresión simple con el martillo de Schmidt, y datos obtenidos de laboratorio para el caso del ensayo de compresión simple ejecutado en el laboratorio de Concreto de la Universidad Privada del Norte – Sede Cajamarca.

Para el análisis de datos se hizo uso del análisis estadístico, el cual permitió recopilar y analizar un conjunto de datos con la finalidad de determinar las propiedades representativas del macizo rocoso. Para la representación y evaluación de los datos obtenidos se hizo uso de gráficos de tendencia con ayuda del software Excel.

Para determinar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y de las discontinuidades se hizo uso del software Rocdata V.5.0. El análisis de la tendencia de la orientación de las discontinuidades se hizo con ayuda del software Dips 5.1. El análisis de estabilidad empleando el método de equilibrio límite se hizo con el software Slide 6.0. El análisis de estabilidad empleando el método de elementos finitos se realizó con el software Phase 2.

Con respecto a los ensayos realizados en campo, en la primera etapa, para evaluar la calidad del registro geomecánico se utilizaron las recomendaciones de Hudson y Priest (Discontinuity and Spacings in Rock, 1976), que a través de dos curvas teóricas para RQD mínimo y máximo, verifican la coherencia del registro del RQD en función del espaciamiento de las discontinuidades, donde se menciona que a mayor fracturamiento por metro, el RQD es menor (comportamiento inverso). Cabe destacar, que el análisis de confiabilidad es un método estadístico inferencial usado generalmente para realizar un control de calidad de datos de las variables de interés (RQD). También se analizó la data de los distintos parámetros geomecánicos considerados para el cálculo del RMR como son la resistencia a la compresión simple, espaciamiento entre diaclasas, estado de las diaclasas, presencia de agua y orientación de las discontinuidades con la técnica de histogramas, con la finalidad de retirar los valores anómalos y así aumentar el grado de confiabilidad en la base de datos geotécnicos. Este análisis de eliminar valores anómalos también se realizó empleando el software Dips, donde las principales familias de diaclasas se determinaron a partir de una concentración de polos que indican tendencias principales de orientación de discontinuidades, lo cual permitió un cálculo más exacto del SMR. Con respecto a la cuantificación del GSI, si bien es un método muchas veces considerado como visual, se utilizó el criterio de Hoek y Brown 1994, para cuantificarlo a partir de valores del RQD y las condiciones de las discontinuidades.

Con respecto a los softwares empleados, se tiene que tener en cuenta que en la actualidad la confiabilidad en cuanto al análisis, cálculos y modelamientos realizados con programas de la rama de ingeniería han evolucionado abismalmente, pues, cada año se va perfeccionando y entre ellos se encuentran los programas del producto Rocscience (Dips, RocData, Slide y Phase2) los cuales han resultado eficaces para el análisis de estabilidad de los taludes evaluados. El programa Slide es el software más completo de análisis de estabilidad de taludes mediante el método de equilibrio límite. Todos los tipos de taludes en suelos y rocas, terraplenes, presas de tierra y muros de contención pueden ser analizados. Los archivos pueden ser importados hacia Phase2 para el análisis de la estabilidad mediante elementos finitos.

En la figura 3 se muestra un esquema del procedimiento seguro para el desarrollo de la investigación.

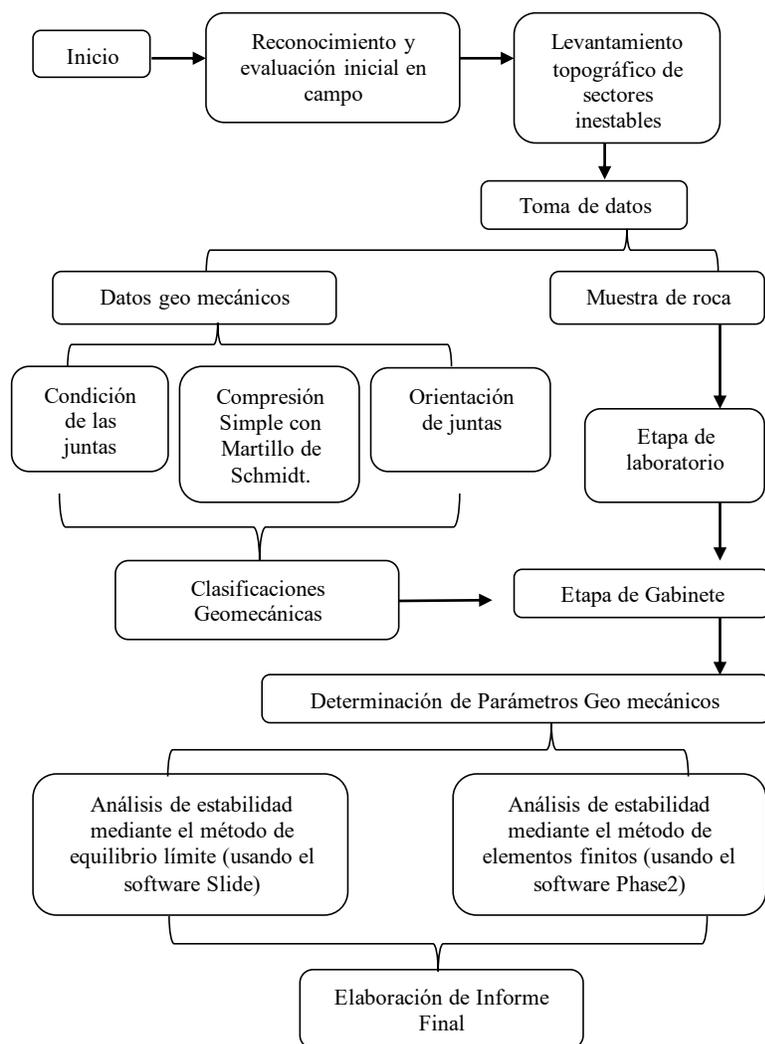


Fig. 3. Esquema de procedimiento seguido para el desarrollo de la investigación. Fuente: Propia.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos de la etapa de campo y laboratorio fueron procesados en gabinete, para obtener los parámetros necesarios para desarrollar la estabilidad de taludes bajo condiciones estáticas y pseudo estáticas usando los softwares Slide y Phase 2.

Con respecto al análisis de discontinuidades, se realizó un levantamiento por celdas de 3 m x 3 m, ubicadas cuatro estaciones geo mecánicas en macizos rocosos a lo largo del sector inestable (4 ventanas en total) en las zonas de macizos rocosos representativos.

Los resultados del análisis de discontinuidades identificadas en el macizo rocoso se muestran en la tabla 02.

TABLA 2  
UBICACIÓN DE TALUDES DE CORTE EVALUADOS Y NUMERACIÓN DE CELDA DE EVALUACIÓN GEOMECÁNICA

Celda de evaluación	Espaciado de las discontinuidades (m)	Persistencia (m)	Abertura	Rugosidad	Tipo de relleno	Alteración meteórica
01	De 0.60 a 0.20	1 a 3	1 a 5	Lig. rugosa	Ninguna	Moderada
02	De 0.60 a 0.20	1 a 3	1 a 5	Lig. rugosa	Ninguna	Moderada
03	De 0.60 a 0.20	1 a 3	> 5	Lig. rugosa	Ninguna	Moderada
04	De 0.60 a 0.20	1 a 3	1 a 5	Lig. rugosa	Suave menor a 5 mm	Moderada

FUENTE: PROPIA

Se realizó el conteo de discontinuidades por una unidad de volumen que representa 1 m<sup>3</sup>. El cálculo del RQD en cada ventana de evaluación geomecánica se obtuvo aplicando la fórmula de Palmstrom (1982). En la tabla 3 se muestra el resultado con respecto al RQD obtenido en cada ventana de evaluación geomecánica.

TABLA 3  
CÁLCULO DEL RQD PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES GEOMECÁNICAS.

Celda	Juntas de Familia 01 S1	Juntas de Familia 02 S2	Juntas de Familia 03 S3	$J_v$	RQD
01	4	3	2	9	85.3
02	5	4	2	11	78.7
03	6	4	3	13	72.1
04	6	5	3	14	68.8

FUENTE: PROPIA

El sistema Rock Mass Rating (RMR) clasifica los macizos rocosos de 0 a 100 puntos. A cada uno de los parámetros anteriores se les asigno un valor, obteniéndose el RMR como la suma de todos ellos. En la tabla 4 se muestra el cálculo del RMR, que se obtiene de la suma algebraica de las calificaciones de los parámetros evaluados.

TABLA 4  
CÁLCULO DEL RQD PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES GEOMECÁNICAS.

Celda	Puntuación de resistencia a la compresión	Puntuación del RQD	Puntuación de espaciado de las juntas	Puntuación				Presencia de agua	RMR Básico	
				Persistencia	Abertura	Rugosidad	Tipo de relleno			Alteración meteórica
01	9.5	17	10	4	1	3	6	3	10	63.5
02	6	15	10	4	1	3	6	3	10	58
03	7	14	10	4	0	3	6	3	10	57
04	6	13	10	4	1	3	2	3	10	52

FUENTE: PROPIA

Para el cálculo del RMR final se tuvo en cuenta el ajuste por la orientación de las discontinuidades, para lo cual se consideró los resultados de probabilidad de fallas de tipo planar, cuña o por vuelco.

TABLA 5  
CÁLCULO DEL RMR FINAL SEGÚN LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA

Celda	RMR básico	Ajuste por orientación de discontinuidades	RMR final	Clasificación del Macizo Rocoso según Bieniawski 1989	Calidad del macizo rocoso
01	63.5	-5	58.5	III	Regular
02	58	-5	53	III	Regular
03	57	-5	52	III	Regular
04	52	-5	47	III	Regular

FUENTE: PROPIA

En la tabla 6 se muestran los parámetros considerados para el cálculo del SMR.

TABLA 6  
CÁLCULO DEL SMR APARTIR DEL RMR BÁSICO Y LAS  
CONDICIONES DE ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

Celda Geomecánica	RMR básico	F1	F2	F3	F4	Tipo de falla predominante	SMR	Descripción del Talud rocoso
01	63.5	0.15	1	-60	0	Planar	54.5	Normal
02	58	0.15	1	-60	0	Planar	49	Normal
03	57	0.85	1	-25	0	Vuelco	35.75	Mala
04	52	0.70	1	-6	0	Planar	47.8	Normal

FUENTE: PROPIA

Se obtuvieron 04 muestras de roca de los taludes rocosos inestables, las cuales se ensayaron en laboratorio de la Universidad Privada del Norte, obteniendo como resistencia a la compresión simple los resultados mostrados en la tabla 7.

TABLA 7  
RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE  
DE LA ROCA INTACTA.

Código de muestra	Longitud (cm)	Area de contacto (cm <sup>2</sup> )	Carga máxima soportada (kg)	Resistencia a la compresión simple qu (MPa)
M - 1	5.90	34.81	48000	135.22
M - 2	5.90	34.81	58000	163.40
M - 3	5.80	33.64	62000	180.74
M - 4	5.80	33.64	54000	157.41

FUENTE: PROPIA

Para realizar el cálculo de parámetros de resistencia se consideró el promedio de la resistencia a la compresión de las muestras ensayadas, el cual es de 159.20 MPa.

Para realizar los análisis de estabilidad bajo los dos métodos planteados en la presente investigación, se realizó el cálculo de parámetros de resistencia. Para ello se hizo uso del software Roc Data. Sumado a los datos obtenidos en campo y ensayos de laboratorio como: resistencia a la compresión simple y el GSI; se hace necesario determinar propiedades de resistencia tanto del macizo rocoso (s, mb, a) y de las discontinuidades (Phir).

TABLA 8  
PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO.

Celda	Propiedades del macizo rocoso (Criterio de Hoek y Brown)								
	UCS (MPa)	GSI	mi	D	Parámetros obtenidos con el software Roc Data				
					mb	s	a	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción
01	159.2	65	17	0.7	2.485	0.006	0.502	9.179	33.83
02	159.2	60	17	0.7	1.888	0.003	0.503	8.256	31.53
03	159.2	60	17	0.7	1.888	0.003	0.503	8.256	31.53
04	159.2	55	17	0.7	1.434	0.001	0.504	7.433	29.25

TABLA 9  
PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LAS DISCONTINUIDADES.

Celda	Peso unitario Kn/m <sup>3</sup>	Propiedades de las discontinuidades (Criterio de Barton Bandis)				
		Resistencia a la compresión en juntas JCS(MPa)	Pphir	JRC	Parámetros obtenidos con el software Roc Data	
					Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción
01	27.85	120	28.6	9	0.054	46.69
02	27.85	48	23.71	9	0.036	38.64
03	27.85	60	22.87	9	0.036	38.67
04	27.85	52	22.13	9	0.034	37.44

FUENTE: PROPIA

El criterio de fallo de Hoek-Brown permite un análisis detallado de la resistencia de la matriz rocosa, por lo cual, en base a valores obtenidos en laboratorio como la resistencia a la compresión simple, y datos tomados en campo como el GSI permite determinar parámetros de resistencia de la matriz rocosa como la Cohesión y el ángulo de fricción. El valor de mi corresponde a la matriz rocosa, se obtiene de ensayos de compresión triaxial, sin embargo, para el caso del presente estudio fue obtenido a partir del software RocData. El criterio de rotura de Barton Bandis es aplicado en macizos rocosos en los cuales su resistencia está controlada por la orientación y geometría de sus discontinuidades, en base a los parámetros tomados en campo como la Rugosidad de discontinuidades y resistencia a compresión de las discontinuidades se obtuvo la cohesión y fricción de las discontinuidades.

Para la determinación del módulo de Young, necesario para el análisis de elementos finitos, se tuvo en cuenta la ecuación generalizada de Hoek y Diederichs (Hoek y Diederichs, 2006) que utiliza el módulo de la roca intacta, GSI y D para el cálculo del módulo del macizo rocoso.

TABLA 10  
CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL MACIZO ROCOSO.

MR	Resistencia a la compresión simple de la roca intacta ( $\sigma_c$ )	Módulo de roca intacta ( $E_i$ )	D	GSI	Módulo de elasticidad del macizo rocoso ( $E_{rm}$ )
400	159.20 MPa	63680 MPa	0.7	55	10675.66 MPa

FUENTE: PROPIA

Para determinar la aceleración sísmica a considerar para el análisis de estabilidad bajo condiciones pseudo estáticas se tomó como referencia la Norma Sísmica E 030.

El análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite, considerando el criterio de resistencia direccional, consiste en la generación de una falla de deslizamiento escalonada, por lo cual aprovecha los planos de debilidad (discontinuidades mapeadas), interrumpiéndose por puentes de roca que generan un aumento de la resistencia al corte. El método empleado para el análisis en el software Slide será el método de Morgenstern-Price, que es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite. Debe satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales. Los bloques son creados dividiendo el material sobre la superficie terrestre generando planos.

Los resultados del análisis de estabilidad de los taludes rocosos por el método de equilibrio límite se muestran en la tabla 11. Si consideramos la norma de AASHTO LRFD, el factor de seguridad mínimo bajo condiciones estáticas es de 1.33, mientras que para condiciones pseudo estáticas es de 1.10.

TABLA 11  
RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ANÁLISIS MEDIANTE MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE

Talud Rocoso	Celda de evaluación	Factor de Seguridad bajo condiciones estáticas	Factor de Seguridad bajo condiciones pseudo estáticas	Descripción
Km 5+140	01	1.084	0.886	Talud inestable
Km 5+190	02	0.948	0.719	Talud inestable
Km 5+200	03	1.278	1.030	Talud inestable

Km 5+220	04	0.991	0.798	Talud inestable
----------	----	-------	-------	-----------------

FUENTE: PROPIA

Se puede observar en la figura 3 la variación de los factores de seguridad bajo condiciones estáticas y pseudo estáticas empleando el método de equilibrio límite.

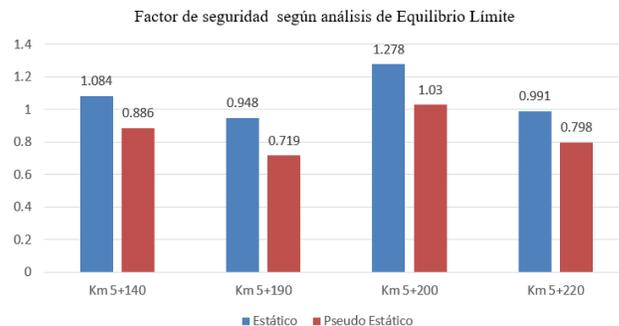


Fig. 3. Resultados de factor de seguridad bajo condiciones estáticas y pseudo estáticas empleando el método de equilibrio límite.

Para el análisis de estabilidad por elementos finitos considerado en el presente estudio se hizo uso del software Phase2, de los productos de Rocscience. El análisis empleando el software permitió obtener el Strength Factor, que matemáticamente constituye una variable similar al factor de seguridad, donde la razón entre resistencia de la roca y esfuerzos inducidos es aplicada en cada elemento y nodo del modelo numérico, a diferencia del factor de seguridad que, al ser un parámetro originalmente diseñado para análisis de equilibrio límite, muestra un valor único para el modelo global.

La técnica de análisis de estabilidad mediante análisis de elementos finitos se basa en un proceso iterativo en el que los parámetros de resistencia de roca se van reduciendo mediante un factor hasta que el modelo se vuelve inestable, el factor de reducción se conoce como SRF (Shear Reduction Factor). Mediante el Strength Factor se puede comprender el comportamiento de la distribución de esfuerzos dentro del talud, reconocer zonas de concentración y relajación de estos y detectar puntos o zonas de inminente inestabilidad. Los resultados del análisis de estabilidad de los taludes rocosos por el método de elementos finitos se muestran en la tabla 12.

TABLA 12  
RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ANÁLISIS MEDIANTE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Talud Rocoso	Celda de evaluación	SRF Crítico bajo condiciones estáticas	SRF Crítico bajo condiciones pseudo estáticas	Descripción
Km 5+140	01	7.27	2.50	Talud estable

<b>Km 5+190</b>	02	3.80	2.89	Talud estable
<b>Km 5+200</b>	03	4.18	3.25	Talud estable
<b>Km 5+220</b>	04	4.00	3.09	Talud estable

FUENTE: PROPIA

Se puede observar en la figura 4 la variación del SFR Crítico bajo condiciones estáticas y pseudo estáticas empleando el método de elementos finitos.

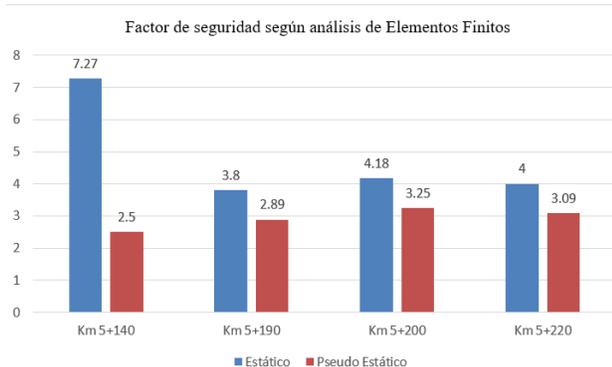


Fig. 4. Resultados de factor de seguridad bajo condiciones estáticas y pseudo estáticas empleando el método de elementos finitos.

Como medida de contención planteada se proyectaría realizar banquetas en el talud de corte, de manera que se logre aumentar el factor de seguridad. Los bancos planteados serían de una inclinación de 1:5 (H: V), altura máxima de 7 metros, con un ancho de berma de 2 metros para el caso del talud del Km 5+140.

Para el caso de los taludes del Km 5+190, 5+200 y 5+220, debido a que presentan un mayor grado de fracturamiento el ángulo de inclinación planteado sería de 1:2 (H:V), altura máxima de 7 metros y con un ancho de berma de 2 m.

El análisis de estabilidad con esta nueva disposición planteada se realizó con el método de equilibrio límite, debido a que según este método los factores de seguridad no superan el mínimo permitido.

En la tabla 13 se muestra la comparación del análisis de estabilidad de taludes rocosos inicial sin considerar un proceso de estabilización y el análisis de estabilidad por equilibrio límite considerando la variación en su disposición geométrica mediante proyección de banquetas.

TABLA 13  
COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES CON GEOMETRÍA INICIAL Y CON LA CONFIGURACIÓN PROYECTADA CONSISTENTE EN REALIZAR BANQUETAS.

Talud Rocosos	Factor de Seguridad bajo condiciones estáticas	Factor de Seguridad bajo condiciones pseudo estáticas	Factor de Seguridad bajo condiciones estáticas con	Factor de Seguridad bajo condiciones pseudo estáticas	Estado final del talud con medida proyectada

<b>Km 5+140</b>	1.084	0.886	1.579	1.258	Estable
<b>Km 5+190</b>	0.948	0.719	1.343	1.100	Estable
<b>Km 5+200</b>	1.278	1.030	1.380	1.100	Estable
<b>Km 5+220</b>	0.991	0.798	1.352	1.214	Estable

FUENTE: PROPIA

En la siguiente figura se muestran los resultados de factores de seguridad antes y después de la medida de rediseño de banquetas considerado.

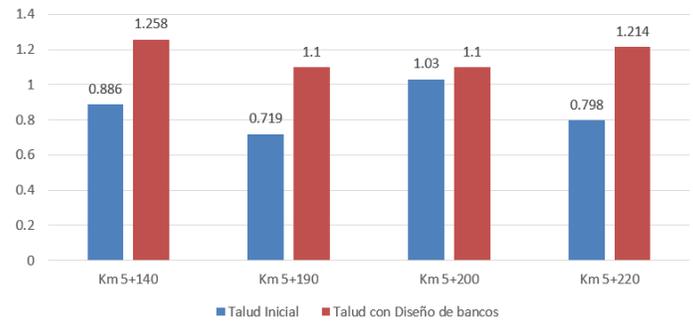


Fig. 5. Resumen de resultados de factores de seguridad bajo condiciones críticas (pseudo estáticas) en talud con geometría inicial y con diseño de banquetas.

#### IV. CONCLUSIONES

Del análisis de estabilidad de taludes realizado en macizos rocosos del sector inestable del Km 5+000 al Km 5+250, de la carretera San Miguel – Llapa, se verificó que el método de equilibrio límite resulta más eficiente para analizar la estabilidad y se adecua mejor a las condiciones de los taludes inestables en la zona de evaluación, ofreciendo un factor de seguridad más conservador, con lo cual se valida la hipótesis planteada en la presente investigación. Dentro de los principales aspectos que permitieron llegar a esta conclusión fue la relevancia de la anisotropía generada en los taludes rocosos debido a la dirección predominante del fracturamiento, ya que a pesar de que la resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa permite clasificarla como una roca de resistencia alta, las características de las discontinuidades ocasionan una posible zona de fallamiento en el talud. Es necesario considerar que al analizar la rotura posible los parámetros de resistencia considerados para las familias de discontinuidades cumplen un papel crucial para determinar si el talud es inestable o no. Considerando el criterio de resistencia de Hoek-Brow el talud rocoso se comporta como un grupo de trozos de roca intacta separados por juntas o discontinuidades que generan el posible plano de debilidad.

Considerando el método de análisis de equilibrio límite los factores de seguridad varían de 0.991 a 1.278 en condiciones estáticas y de 0.798 a 1.030 en condiciones

pseudo estáticas, no llegando al mínimo permisible, lo cual se debe principalmente debido a la geometría que presenta el talud rocoso inestable, así como a las características geomecánicas del macizo rocoso y la orientación de las discontinuidades. Con respecto al método de elementos finitos se determinó que el Strength Factor Tension obtenido de cada análisis superan largamente el mínimo permisible, debido a que los parámetros elásticos considerados dan la condición de estabilidad a los taludes rocosos. El talud de mayor estabilidad según este análisis corresponde al ubicado en el Km 5+200 y el más inestable corresponde al Km 5+220.

El análisis mediante el método de elementos finitos considera las características de deformabilidad del material rocoso, sin embargo, no considera muy relevantes factores como la orientación de las familias principales de discontinuidades, dando como resultado valores de estabilidad menos conservadores que podría no reflejar la realidad del análisis. Este método sería más recomendado para taludes conformados por materiales continuos donde las características de orientación de las discontinuidades no tengan mayor implicancia.

La principal diferencia al momento de analizar los taludes mediante el método de equilibrio límite y método de elementos finitos radicaría en determinar la causal principal de la inestabilidad. Cuando la principal causal sería la dirección de las discontinuidades presentes y la geometría del talud inestable resultaría más adecuado realizar un análisis por equilibrio límite, mientras que cuando la principal causal serían las propiedades de deformabilidad del material, sin tomar como principal relevancia una orientación de las discontinuidades, el método más adecuado sería el de elementos finitos.

## V. REFERENCIAS

- [1] Herrero Lizano, J (2020, abril). *Guía para el Proyecto de Cimentaciones en Obras de Carretera con Eurocodigo*. Abril 2020, from [https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/guiaproycimcrtraec7\\_ejempl os\\_cimsup-pendiente\\_edicion.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/guiaproycimcrtraec7_ejempl os_cimsup-pendiente_edicion.pdf)
- [2] Valiente Sanz, Ricardo (2015, marzo). *Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo*. Marzo 2015, from <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/16157>
- [3] Vasquez Cordano, Arturo (2008, setiembre). *Ensayos sobre el rol de la Infraestructura Vial en el Crecimiento Económico del Perú*. Setiembre 2008, from <https://cies.org.pe/wp-content/uploads/2016/07/dyp-39.pdf>
- [4] Espinoza Gonzales, A (2020, agosto). *Propuesta de diseño estructural del pavimento rígido convencional y fibroreforzado de la Av. Sánchez Cerro en Piura usando la tecnología del reciclado mecánico*.
- [5] Cervantes Quintana, R (2015). *Mecánica de Suelos Aplicada*.
- [6] Arones Apestegui, J (2021). Caracterización de las discontinuidades y Análisis de la estabilidad del talud en roca en el asentamiento humano Inty Llacta., from: <https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/>
- [7] Hizarra Samaniego, J, e.at (2021). *Evaluación geomecánica del macizo rocoso para determinar el ángulo de reposo del talud, carretera tramo San Antonio Puente Chiquiacc, Huancavelica-2021*, from: [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10537/2/V\\_FIN\\_110\\_TE\\_Hizarra\\_Lopez\\_Navarro\\_2021.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10537/2/V_FIN_110_TE_Hizarra_Lopez_Navarro_2021.pdf)
- [8] ChambiTapahuasco, Gina (2015). Estudio de Estabilidad de Taludes en los Macizos Rocosos de la Carretera Ticaco Candarave en las Progresivas: 124+560 al 129+000, from: <https://repositorio.unjbg.edu.pe/server/api/core/bitstreams/378f2cb7-8731-42d6-908c-b67f5b23c163/content>.
- [9] Pozo García, Raúl (2010). *Aplicación del Criterio de Rotura no Lineal de Hoek y Bown a la Estabilidad de Taludes Altos en Macizos Rocosos (2010)*.
- [10] Hernandez Sampieri, R (2014). *Metodología de la Investigación*. Sexta Edición (2014).