

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS PROFESIONAL

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA CARRETERA
LAJAS – AJIPAMPA**

Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO GEÓLOGO

Presentado por:
Bach. LUZ ROXANA RODRIGO CAMPOS

Asesor:
MCs. Ing. JOSÉ ALFREDO SIVERONI MORALES

Cajamarca – Perú

2017

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme dado la fortaleza y perseverancia para seguir con mi proyecto de vida.

A mi alma mater la Universidad Nacional de Cajamarca, específicamente a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica, por formarme profesionalmente.

A mi asesor el M.Cs. Ing. José Alfredo Siveroni Morales por su guía y orientación durante todo el desarrollo de la tesis.

A mi familia por su amor, esfuerzo, sacrificio, confianza y apoyo incondicional, que sin duda han sido fundamentales para alcanzar otra meta más en mi vida.

¡Sin presión no habrá diamantes! Mary Case.

DEDICATORIA

A mis queridos padres Luz y Juan, a mi hermano Jhordan y a mi abuelita Lucia, porque son mi apoyo y soporte en todas las decisiones de mi vida, quienes comparten mis alegrías y disminuyen mis tristezas.

A mi amado esposo Ivan por brindarme su apoyo, confianza, amor y comprensión.

A mi precioso hijo Diego por su ternura y amor, mi fuente de inspiración para seguir adelante.

CONTENIDO	Pág.
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2.2 BASES TEÓRICAS	4
2.2.1 GEOMETRÍA DE UN TALUD	4
2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS	5
2.2.3 CRITERIOS DE ROTURA.....	10
2.2.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	14
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	18
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	19
3.2 ACCESIBILIDAD	19
3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
3.3.1 TIPO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	20
3.3.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	20
3.3.3 MUESTRA	20
3.3.4 UNIDAD DE ANÁLISIS	20
3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	20
3.4.1 TÉCNICAS:	20
3.4.2 INSTRUMENTOS Y MATERIALES	20
3.4.3 SOFTWARES	21
3.5 PROCEDIMIENTO Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	21
3.5.1 PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO EN CAMPO	21
3.5.2 RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO	22
3.5.3 TRATAMIENTO DE DATOS.....	27
3.5.4 PROPIEDADES GEOMECAÑICAS.....	35
3.5.5 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	39

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	41
4.1 RESULTADOS	41
4.1.1 ANÁLISIS ESTEREOGRÁFICO - CINEMÁTICO.....	41
4.1.2 ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE (DESLIZAMIENTOS PLANARES)	41
4.1.3 ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE (DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES).....	42
4.2 PROPUESTA DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES	45
4.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	47

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
5.1 CONCLUSIONES	48
5.2 RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de suelos según el "Sistema de Clasificación de Suelos Unificado" SUCS (González, 2006).....	5
Tabla 2. Índice de calidad de la roca en función al RQD.....	6
Tabla 3. Parámetros y rango de valores para la clasificación RMR ₈₉ (Bieniawski, 1989).	7
Tabla 4. Calidad de macizo rocoso en función al RMR ₈₉ (Bieniawski, 1989).	7
Tabla 5. GSI para macizos rocosos homogéneos (Hoek E., 2007).....	8
Tabla 6. GSI para macizos rocosos heterogéneos (Marinos, Marinos, & Hoek, 2007)....	9
Tabla 7. Estimación del m _i según el tipo de roca (Hoek E. , 2007).....	13
Tabla 8. Guías para la estimación del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek & Brown, D. Extraída de Hoek et al., 2002.	14
Tabla 9. Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Suárez, 2007).	17

	Pág.
Tabla 10. Coordenadas UTM - WGS84 del tramo a estudiar.	19
Tabla 11. Acceso a la zona de estudio.	19
Tabla 12. Distribución de pendientes del área de investigación.....	21
Tabla 13. Distribución de unidades lito-estratigráficas en la carretera Lajas – Ajipampa.	22
Tabla 14. Estaciones documentadas en la carretera Lajas – Ajipampa.	27
Tabla 15. Estación N° 01 en la Formación Cajamarca.	28
Tabla 16. Estación N° 02 talud de depósitos deluviales – calizas de la Formación Cajamarca.	28
Tabla 17. Estación N° 03 talud de depósitos fluviales – calizas de la Formación Cajamarca.	29
Tabla 18. Estación N° 04 talud en calizas de la formación Cajamarca.	29
Tabla 19. Estación N° 05 en la Formación Cajamarca.	30
Tabla 20. Estación N° 06 registrada en la formación Cajamarca.	30
Tabla 21. Estación N° 07 en la Formación Cajamarca.	31
Tabla 22. Estación N° 08 macizo rocoso homogéneo - Formación Pulluicana.	31
Tabla 23. Estación N° 09 muro de gravedad.	32
Tabla 24. Estación N° 10 macizo rocoso – Formación Pulluicana.....	32
Tabla 25. Estación N° 11 depósitos deluviales – Formación Pulluicana.	33
Tabla 26. Estación N° 12 macizo rocoso – formación Pulluicana.	33
Tabla 27. Estación N° 13 muro de gaviones.	34
Tabla 28. Estación N° 14 depósitos deluviales – formación Pariatambo.	34
Tabla 29. Estación N° 15 depósitos coluviales.	35
Tabla 30. Ubicación y propiedades de los perfiles realizados en cada estación.	36
Tabla 31. Macizos rocosos, utiliza el criterio de rotura de Hoek-Brown.	37
Tabla 32. Suelos, emplea el criterio de rotura de Mohr - Coulomb.	38
Tabla 33. Discontinuidades, se utilizó el criterio de rotura de Barton - Bandis:.....	38
Tabla 34. Muros de contención, se utiliza el modelo de resistencia infinita:.....	38
Tabla 35. Clasificación de los análisis, según el comportamiento de los materiales.	39
Tabla 36. Descripción de escenarios para el análisis de taludes.	40
Tabla 37. Rangos de factores de seguridad recomendados por Hoek (2007).	40
Tabla 38. Análisis estereográfico - cinemático del perfil 7-7'.....	41

	Pág.
Tabla 39. Análisis de equilibrio límite (deslizamientos planares) de los perfiles 1-1', 4-4' y 6-6'.....	42
Tabla 40. Análisis de equilibrio límite (deslizamientos rotacionales) del perfil 15-15'. 42	42
Tabla 41. Análisis de perfiles conformados por material tipo suelos - macizos rocosos.	43
Tabla 42. Análisis de perfiles conformados por macizos rocosos homogéneos.	44
Tabla 43. Análisis de perfiles conformados por suelos - muros de contención:	45
Tabla 44. Propuesta de estabilización para los taludes con FS <1.0.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los elementos de un talud (Suárez, 2007).	4
Figura 2. Envolventes de Mohr - Coulomb en términos de esfuerzos tangenciales y normales (a) y esfuerzos principales (b) Para un estado tensional situado por debajo de las rectas o envolventes no se producirá la rotura.	11
Figura 3. Envolventes de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b), representación de las diferentes condiciones de esfuerzo para rotura de la matriz rocosa.....	12
Figura 4. Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Suárez, 2007).....	15
Figura 5. Esquema del Método Equilibrio Limite (Luis Paredes, 2010).	16

ÍNDICE DE FOTOS

Pág.

Foto 1. Calizas bituminosas de la Formación Pariatambo, coordenadas: E 747422, N 9275285, Cota 2080 m.s.n.m.	22
Foto 2. Intercalaciones de calizas intemperizadas con lutitas grisáceas del Formación Pulluicana, coordenadas: E 748697, N 9274817, Cota 2113 m.s.n.m.	23
Foto 3. Afloramiento de la Formación Quilquiñan – Mujarrún, coordenadas: E 749107, N 9274692, Cota 2115 m.s.n.m.	24
Foto 5. Contacto litológico ks-ca/ks-qm, coordenadas: E 748697, N 9274825, Cota 2117 m.s.n.m.	24
Foto 6. Calizas bien estratificadas de la Formación Cajamarca.	25
Foto 7. Depósitos cuaternarios coluviales, coordenadas: E 747465, N 9275279, Cota 2080 m.s.n.m.	26
Foto 8. Depósitos cuaternarios fluviales generados por el Río Chotano.	26

RESUMEN

La carretera Lajas – Ajipampa corresponde a las progresivas 141+500 m y 138+250 m respectivamente de la carretera Chota – Chongoyape, en la cual se realizó la investigación con el objetivo analizar la estabilidad de taludes, caracterizar sus factores, determinar el factor de seguridad, zonificar la estabilidad y proponer medidas de estabilización; se verificó que su estabilidad está condicionada por las características de sus factores, obteniendo que los taludes presentan una geometría variada: altura de 5m a 40m, pie de talud de 5m hasta 40m, pendientes de 40° hasta 85°, contando las formaciones desde la Pariatambo hasta la Cajamarca, depósitos cuaternarios coluviales, deluviales y fluviales; que por su geomecánica son materiales frágiles y los suelos deluviales son dúctiles procesado en el software RocData; el factor de seguridad se calculó a través de los softwares RocPlane y Slide en estado de saturación y sismicidad para taludes de macizos rocosos son estables, los taludes de suelos–macizo rocosos todos son inestables, con respecto a los muros solo el de gaviones es inestable; la zonificación de su estabilidad en estado natural presenta taludes estables relativos y estables a largo plazo en cambio en estado de saturación y sismicidad existe cuatro niveles: inestable, estable relativo, estable a corto plazo y estable a largo plazo; para lo cual se propone estabilizar los taludes implementando canales de coronación, muros de gaviones y optimizando la geometría del talud.

Palabras clave: Análisis, Factor de Seguridad, Inestabilidad, Estabilización.

ABSTRACT

The Lajas - Ajipampa road corresponds to the progressive 141 + 500m and 138 + 250m respectively of the Chota - Chongoyape road, in which the research was carried out with the objective of analyzing slope stability, characterizing its factors, determining the safety factor, zoning stability and proposing stabilization measures; it was verified that its stability is conditioned by the characteristics of its factors, obtaining that the slopes have a varied geometry: height of 5m to 40m, foot of slope of 5m to 40m, slopes of 40° to 85°, counting the formations from the Pariatambo to Cajamarca, colluvial, deluvial and fluvial quaternary deposits; which for their geomechanics are fragile materials and the deluvial soils are ductile processed in the software RocData; the safety factor was calculated through the software RocPlane and Slide in a state of saturation and seismicity for slopes of rocky massifs are stable, slopes of rocky solid soils are all unstable, with respect to the walls only the one of gabions is unstable ; the zoning of its stability in the natural state has relatively stable and stable slopes in the long term, while in the state of saturation and seismicity there are four levels: unstable, stable relative, stable in the short term and stable in the long term; for which it is proposed to stabilize the slopes by implementing coronation channels, gabion walls and optimizing the slope geometry.

Key words: Analysis, Safety factor, Instability, Stabilization.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La carretera Lajas – Ajipampa corresponde a las progresivas 141+500 m y 138+250 m respectivamente, de la carretera Chota – Chongoyape; los taludes diseñados cortan las rocas de la Formación Cajamarca, Quilquiñan - Mujarrún, Pulluicana y Pariatambo, y depósitos cuaternarios; se observa caída de bloques rocosos en taludes de altas pendientes y grandes deslizamientos de suelos. Proyectando realizar un análisis de la estabilidad de los taludes a largo del eje de la carretera, caracterizando los factores geométricos, geológicos y geomecánicos, para realizar un análisis de la estabilidad y proponer posibles medidas de estabilización; para lo cual se formula ¿Cuál es el análisis de estabilidad de taludes en la carretera Lajas – Ajipampa?

En la actualidad, la carretera Lajas – Ajipampa es frecuentemente transitada, es un tramo de la carretera Chota – Chiclayo, acceso de los distritos Llama, Huambos y Cochabamba a la provincia de Chota, es una vía de comunicación beneficiosa a centenares de ciudadanos; asimismo es un área con carencia de estudios geocientíficos detallados, en consecuencia surge la necesidad de conocer la estabilidad de taludes a través de la caracterización de los factores geométricos, geológicos y geomecánicos y contribuir con información para el diseño de taludes óptimos en términos de seguridad y economía.

Entre Lajas y Ajipampa existe una distancia de 3.25 kilómetros, donde se busca caracterizar los factores influyentes en el análisis de la estabilidad de taludes. Así mismo cabe precisar que los ensayos de resistencia en laboratorio son costosos y serán reemplazados por pruebas de resistencia en campo.

La investigación tiene como objetivo general: analizar la estabilidad de taludes en la carretera Lajas – Ajipampa; y los objetivos específicos son: caracterizar los factores geométricos, geológicos y geomecánicos; determinar el factor de seguridad de taludes; elaborar un plano de zonificación de la estabilidad y proponer medidas de estabilización de taludes.

Se induce que la estabilidad de taludes en la carretera Lajas – Ajipampa está condicionada por las características de los factores geométricos, geológicos y geomecánicos.

En el primer capítulo se describe el planteamiento y formulación del problema, justificación, delimitación, alcances, limitaciones, objetivos e hipótesis de la investigación.

El segundo capítulo contiene los antecedentes teóricos de la investigación locales, nacionales e internacionales, las bases teóricas sobre geometría de un talud, clasificación de los materiales geológicos, criterios de rotura, análisis de estabilidad y definición de términos básicos.

El tercer capítulo está constituido por la descripción de los materiales y métodos que se utilizarán en la investigación: ubicación geográfica, accesibilidad, metodología, técnicas e instrumentos de recolección de datos y la descripción del procedimiento.

En el cuarto capítulo se presentan el análisis y discusión de resultados a los que he llegado al final de la investigación indicando: las propiedades de entrada para el análisis, metodología de análisis, resultados, propuesta de estabilización de taludes y la contrastación con la hipótesis planteada.

El quinto capítulo muestra las conclusiones para cada objetivo que se ha planteado y las recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

Wilson (1984) Realizó para el INGEMMET el estudio geológico de los cuadrángulos de Jayanca (13-d), Incahuasi (13-e), Cutervo (13-f), Chiclayo (14-d), Chongoyape (14-e), Chota (14-f), Celendín (14-g), Pacasmayo (15-d) y Chepén (15-e). Estudió la estratigrafía y la geología estructural a escala 1:100 000.

Pérez (2005) Concluye que el análisis de estabilidad de macizos rocosos frente a roturas planas o en cuña requiere el uso de programas.

Morales (2009) Realizó la caracterización geotécnica de taludes utilizando las tablas de GSI y RMR₈₉, también determinó los ángulos de diseño en función al factor de seguridad.

Mancera (2010) Realizó el análisis de estabilidad de taludes para determinar las fuerzas inestables y así proponer el diseño de soporte artificial para proveer seguridad al corte.

Rojas & Oscátegui (2010) Realizaron el “Estudio Definitivo para la Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera: Chongoyape - Cochabamba - Cajamarca”, mediante el análisis y evaluación de los aspectos geológicos - geodinámicos, y las implicaciones de carácter geotécnico.

Zavala & Rosado (2011) Evaluaron la ocurrencia de peligros geológicos y geohidrológicos en términos de susceptibilidad, y sus factores detonantes para determinar el grado de peligrosidad en la región Cajamarca.

Sobarzo, Villalobos, & King (2011) Concluyen que es fundamental contar con antecedentes geológicos que permitan caracterizar los posibles planos de deslizamiento y el grado de meteorización del macizo rocoso.

Barboza, Zúñiga, & Aguilar (2015) Realizaron el análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite aplicado a taludes o laderas.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 GEOMETRÍA DE UN 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, 2007).

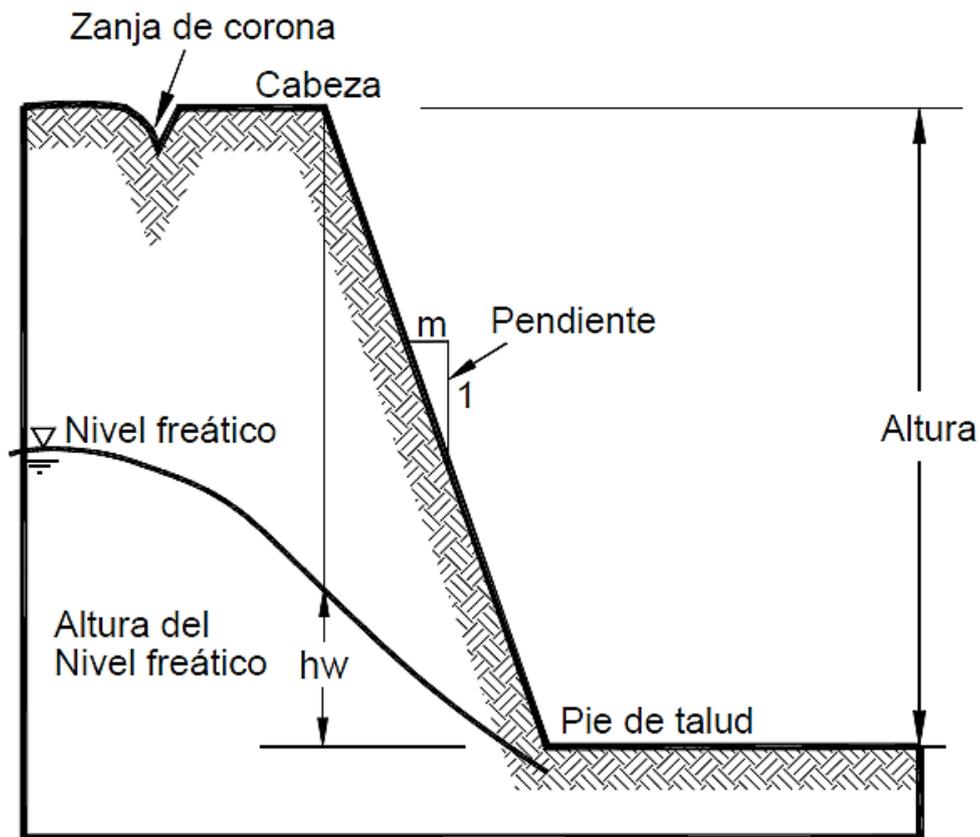


Figura 1. Esquema de los elementos de un talud (Suárez, 2007).

En el talud se definen los siguientes elementos constitutivos:

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 no son accidentes topográficos bien marcados.

Cabeza: Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.

Pie: Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.

Altura de nivel freático: Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.

Pendiente: Es la medida de la inclinación 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: Pendiente: 45°, 100%, o 1H: 1V.

2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS

2.2.2.1 Clasificación de los suelos (SUCS)

Tabla 1. Clasificación de suelos según el "Sistema de Clasificación de Suelos Unificado" SUCS (González, 2006).

Divisiones Principales		Símbolos del grupo	Nombres Típicos
Suelos de Grano Grueso Más de la mitad del material retenido en el tamiz N° 200	Gravas Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz N° 4 (4,76 mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	GW Gravas, bien graduadas, mezclas grava - arena, pocos finos o sin finos.
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GP Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.
			GM Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.
		Arenas Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz N° 4 (4,76 mm)	Arenas limpias (pocos o sin finos)
	SW Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		
	Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)		SP Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.
			SM Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
	Suelos de Grano Fino Más de la mitad del material pasa por el tamiz N° 200	Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50	SC Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.
ML Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.			
CL Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.			
Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50		OL Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.	
		MH Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.	
		CH Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.	
Suelos muy orgánicos	OH Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.		
	PT Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.		

2.2.2.2 Clasificación de los Macizos Rocosos

Las clasificaciones de los macizos rocosos se basan en factores que determinan su comportamiento mecánico:

- Propiedades de la matriz rocosa.
- Frecuencia y tipo de las discontinuidades, que definen el grado de fracturación, el tamaño y la forma de los bloques del macizo, sus propiedades hidrogeológicas, etc.
- Grado de meteorización o alteración.
- Estado de tensiones in situ.
- Presencia de agua.

Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas para taludes son RQD, RMR y GSI.

a) Índice de Calidad de la Roca (RQD)

Para determinar el RQD en una línea de mapeo, se puede obtener el promedio del espaciado de las discontinuidades (número de discontinuidades dividida para la longitud de la línea de muestreo), (Gavilanes & Andrade, 2004). Se calcula según la ecuación:

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$$

Dónde: λ = Nro. De Discontinuidades/Longitud

Tabla 2. Índice de calidad de la roca en función al RQD.

RQD (%)	CALIDAD DE LA ROCA
<25	Muy Mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Muy Buena

b) Sistema de Valoración del Macizo Rocosos (RMR), Bieniawski 1989

Los siguientes parámetros son usados para clasificar un macizo rocoso utilizando el sistema RMR:

1. Resistencia a la comprensión uniaxial de la roca.
2. Índice de Calidad de la Roca (RQD)
3. Espaciado entre discontinuidades.
4. Condición de las discontinuidades.
5. Condición de infiltraciones de agua.

Tabla 3. Parámetros y rango de valores para la clasificación RMR₈₉ (Bieniawski, 1989).

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES							
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo de carga puntual (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Comprensión simple (MPa)		
		Comprensión simple (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
		Valor	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
		Valor	20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades (m)		>2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06		
		Valor	20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura (mm)	Nada	<0.1	0.1-1	1-5	>5		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeram. rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
4	Relleno (mm)		Ninguno	Duro	Duro	Blando	Blando		
		Valor	6	4	2	2	0		
				<5	>5	<5	>5		
4	Alteración		Inalterada	Ligeram. alterada	Moderadam. alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Valor	6	5	3	1	0		
5	Flujo de agua en las discont.	Relación Pagua/Pprinc.	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Condiciones generales	Completo. secas	Ligeram. húmedas	Húmeda	Goteando	Agua fluyendo		
		Valor	15	10	7	4	0		

Tabla 4. Calidad de macizo rocoso en función al RMR₈₉ (Bieniawski, 1989).

CLASE	CALIDAD	CALIDAD DE LA ROCA
I	Muy buena	100
II	Buena	80-61
III	Media	41-40
IV	Mala	21-40
V	Muy mala	<20

c) Índice de resistencia geológico (GSI)

La resistencia de un macizo rocoso fracturado depende de las propiedades de los bloques de roca intacta y, también de la libertad de éstos para deslizar y girar bajo distintas condiciones de esfuerzo. El GSI proporciona un sistema para estimar la disminución de la resistencia que presentaría un macizo rocoso con diferentes condiciones geológicas.

Tabla 5. GSI para macizos rocosos homogéneos (Hoek E., 2007).

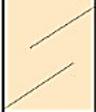
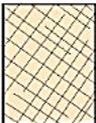
<p>ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA ROCAS FRACTURADAS (Hoek & Marinos, 2000)</p> <p>Estimar el valor promedio del GSI para la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades. No intentar ser muy preciso. Citar un rango de 33 a 37 es mas realístico que un GSI de 35. Note que las tablas no se aplican a las fracturas estructuralmente controladas. Cuando los planos estructurales débiles están en una orientación desfavorable con respecto de la cara excavada, estas dominarán el comportamiento de todo el macizo rocoso. La resistencia de cizalla de las superficies de la rocas son propensas a deteriorarse como el resultado de cambios en el contenido de humedad, se reducirá si hay presencia de agua. Cuando se trabaja con rocas en las categorías de débil a muy débil, se debería hacer un desplazamiento hacia la derecha. La presión del agua es tratada con análisis de esfuerzos efectivos.</p>		<p>CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES</p> <p>MUY BUENA Superficies muy rugosas, inalteradas y frescas.</p> <p>BUENA Superficies rugosas, ligeramente intemperizadas, con pátinas de óxidos de Hierro.</p> <p>REGULAR Superficies lisas, moderadamente intemperizadas y/o alteradas.</p> <p>MALA Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos compactos o fragmentos angulares.</p> <p>MUYMALA Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimiento o rellenos arcillosos blandos.</p>				
<p>ESTRUCTURA</p>		<p>DECRECE LAS CONDICIONES SUPERFICIALES →</p>				
<p>INTACTA O MASIVA</p>  <p>Especimen de roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.</p>	<p>90</p>			<p>N/A</p>	<p>N/A</p>	
<p>BLOCOSA</p>  <p>Macizo rocoso inalterado bien trabado, definido por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades.</p>	<p>80</p>	<p>70</p>	<p>60</p>			
<p>MUY BLOCOSA</p>  <p>Macizo rocoso trabado, parcialmente perturbado, definido por bloques angulares de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades.</p>		<p>50</p>				
<p>BLOCOSA/PERTURBADA/DEFORMADA</p>  <p>Plegada, bloques angulares de mucha familias de discontinuidades, persistencia de los planos de estratificación o esquistocidad.</p>		<p>40</p>	<p>30</p>			
<p>DESINTEGRADA</p>  <p>Pobremente trabada, macizo rocoso muy fracturado con mezcla de fragmentos de roca angulares y redondeados.</p>			<p>20</p>			
<p>LAMINADA/ CIZALLADA</p>  <p>Ausencia de blocosidad debido a espaciados cercanos de débil esquistocidad o planos de cizalla.</p>	<p>N/A</p>	<p>N/A</p>			<p>10</p>	

Tabla 6. GSI para macizos rocosos heterogéneos (Marinos, Marinos, & Hoek, 2007).

CONDICIONES SUPERFICIALES DE LAS DISCONTINUIDADES (Predominantemente los planos de estratificación)	DECRECE LA CALIDAD DE LAS DISCONTINUIDADES											
	MUY BUENAS Superficies frescas inalteradas muy rugosas	BUENAS Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas u oxidadas	REGULARES Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas	MALAS Superficies muy lisas, ocasionalmente cizalladas con revestimientos compactos o rellenos de fragmentos angulares	MUY MALAS Superficies muy lisas, cizalladas o alternante de meteorizadas con revestimientos o rellenos de arcillas suaves.							
<p>ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA MACIZOS ROCOSOS HETEROGÉNEOS COMO LOS FLYSCH (V. Marinos, 2007)</p> <p>Los macizos rocosos heterogéneos son aquellos que continen capas claramente alternadas de diferentes tipos de litologías con significantes diferencias en sus propiedades de resistencia. Para flysch, una típica formación con macizos rocosos heterogéneos, estas alteraciones consisten de areniscas y limolitas. Las lutitas pueden estar presentes. Para la descripción de la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades (particularmente de los planos de estratificación), escoger un cuadro en la tabla. La selección de la estructura debería ser basada en la perturbación tectónica (imperturbada, moderadamente perturbada, fuertemente perturbada - plegada, desintegrada, cizallada), la proporción de limolita contra arenisca y su expresión o no de estratificación dentro de las capas de limolita. En el tipo IV y V cuando el grosor de areniscas excede 50cm, un incremento de 5 puntos de GSI es recomendada. Del tipo 4 a los siguientes, los planos de estratificación están perceptibles dentro de las limolitas. Localiza la posición en el cuadro que corresponda a las condiciones y estima el valor promedio de GSI de las curvas. La determinación de la estructura y de las condiciones de discontinuidades deben tener un rango entre dos campos adyacentes. Note que el criterio de Hoek-Brown no se aplica a macizos con discontinuidades estructuralmente controladas. Cuando discontinuidades planares, débiles, continuas y con orientaciones desfavorables están presentes, estas dominarán el comportamiento del macizo rocoso. La resistencia de algunos macizos rocosos es reducida por la presencia de agua subterránea y puede considerada por un ligero movimiento a la derecha en las columnas de condiciones regulares, malas y muy malas. La presión del agua no cambia el valor de GSI y pueden ser tratados con análisis de esfuerzos efectivos.</p> <p>ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN</p> <p>TIPO I: Imperturbado, con capas de areniscas de grosores de anchas a medias con lentes finos esporádicos de limolitas. En túneles superficiales o taludes donde el confinamiento es pobre, el modo de fractura tiene características cinemáticas controladas por los planos de estratificación y el GSI pierde significado.</p> <p>TIPO II: Limolitas masivas imperturbadas (los planos de estratificación no son perceptibles) con esporádicas capas finas de areniscas</p> <p>TIPO III: Areniscas moderadamente perturbadas con delgados estratos de limolitas</p> <p>TIPO IV: Macizos rocosos moderadamente perturbados con areniscas y limolitas en similares cantidades</p> <p>TIPO V: Limolitas moderadamente perturbadas con intercalaciones de areniscas</p> <p>TIPO VI: Limolitas moderadamente perturbadas con esporádicas intercalaciones de areniscas</p> <p>TIPO VII: Macizos rocosos muy perturbados y plegados, que conservan su estructura con areniscas y limolitas en similar extensión</p> <p>TIPO VIII: Macizos rocosos muy perturbados y plegados de intercalaciones de limolitas y areniscas. La estructura se conserva y la deformación-cizalla no es muy fuerte</p> <p>TIPO IX: Macizo rocoso desintegrado que puede ser encontrado en zonas falladas y/o de alta meteorización. Se encuentran principalmente materiales deleznables con algunas limolitas deformadas entre las piezas de roca</p> <p>TIPO X: Limolitas o lutitas tectónicamente deformadas con intenso plegamiento y fallamiento con capas de areniscas rocas y deformadas, llegando a formar una estructura caótica</p> <p>TIPO XI: Limolitas o lutitas fuertemente cizalladas tectónicamente formando una estructura caótica con paquetes de arcilla. Las delgadas capas de areniscas son transformadas a pequeñas piezas de roca. Al extremo, el comportamiento es como de un suelo</p>	80	70	60	50	40	30	20	10				
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

→ Disminución a la derecha si hay deformación luego de la perturbación tectónica

2.2.3 CRITERIOS DE ROTURA

2.2.3.1 El criterio de rotura de Mohr - Coulomb

La teoría de Mohr - Coulomb es un modelo matemático que describe la respuesta de materiales quebradizos, tales como hormigón, o agregados de partículas como el suelo, a esfuerzo cortante, así como tensión normal.

Este criterio expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de tensiones, obteniéndose la relación entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes en el momento de la rotura mediante la expresión matemática (González de Vallejo, 2004).

La relación del envolvente se expresa como:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

Dónde:

τ : tensión tangencial sobre el plano de rotura.

σ : tensión de normal sobre el plano de rotura.

c : cohesión de la matriz rocosa.

ϕ : ángulo de rozamiento de la matriz rocosa.

El criterio puede expresarse igualmente en función de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 :

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3 [\sin 2\theta + \tan \phi \cos(1 - \cos 2\theta)]}{\sin 2\theta - \tan \phi \cos(1 + \cos 2\theta)}$$

Permitiendo obtener la resistencia en cualquier plano definido por θ . Para el plano crítico de rotura, $\theta = 45^\circ + \phi/2$, la expresión anterior tomará la forma:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi + \sigma_3 (1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)}$$

Si se da la condición $\sigma_3 = 0$, σ_1 será la resistencia a la compresión simple de la roca:

$$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

El criterio también proporciona el valor de la resistencia a tracción:

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi}$$

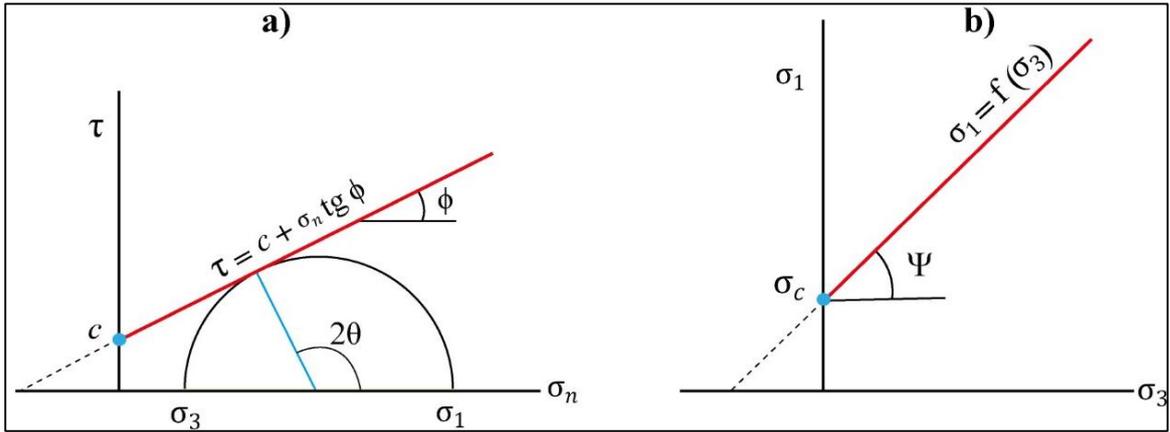


Figura 2. Envolventes de Mohr - Coulomb en términos de esfuerzos tangenciales y normales (a) y esfuerzos principales (b) Para un estado tensional situado por debajo de las rectas o envolventes no se producirá la rotura.

2.2.3.2 El Criterio de Rotura de Hoek-Brown

Para evaluar la resistencia de la matriz rocosa es más adecuado un criterio no lineal, donde la representación gráfica de la rotura es una curva de tipo cóncavo. El propuesto por Hoek - Brown (1980) es un criterio empírico de rotura no lineal válido para evaluar la resistencia de la matriz rocosa isótropa en condiciones triaxiales:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + \sigma_{ci}^2}$$

Donde (σ_1 y σ_3) son los esfuerzos principales mayor y menor en rotura, σ_{ci} es la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa y m_i , es una constante que depende de las propiedades de la matriz rocosa.

El criterio expresado adimensionalmente, en términos de esfuerzos normalizados, con respecto a σ_{ci} , tiene la forma:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{ci}} = \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$

La resistencia de la roca a compresión simple viene dada por la expresión anterior sustituyendo $\sigma_3 = 0$, y la resistencia a tracción se obtiene resolviendo para $\sigma_1 = 0$ y $\sigma_1 = \sigma_t$

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \sigma_{ci} \left(m_i - \sqrt{m_i^2 + 4} \right)$$

La expresión del criterio de rotura en función de los esfuerzos tangenciales y normales es:

$$\tau = A\sigma_{ci} \left(\frac{\sigma_n - \sigma_t}{\sigma_{ci}} \right)^B$$

Donde σ_t es la resistencia a tracción y A, B son constantes dependientes del valor de m_i .

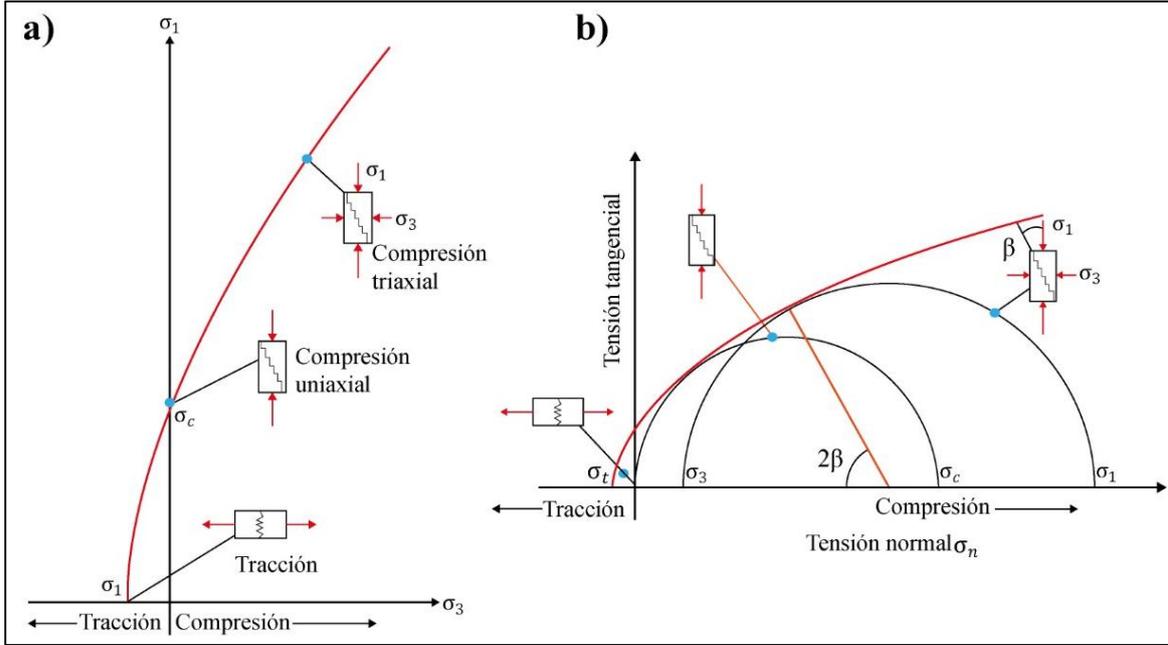


Figura 3. Envolturas de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b), representación de las diferentes condiciones de esfuerzo para rotura de la matriz rocosa.

Con la finalidad de ampliar el rango de aplicación el Criterio de Hoek y Brown Generalizado, los valores del macizo rocosos se obtienen de:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

- m_b es un valor reducido de la constante del material m_i y está dado por:

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right)$$

- s y a son constantes del macizo rocoso dadas por las siguientes relaciones:

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

- D es un factor que depende sobre todo del factor de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por efectos de voladura o por la relajación de los esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos *in situ* inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

Tabla 7. Estimación del m_i según el tipo de roca (Hoek E. , 2007).

TIPO ROCA	CLASE	GRUPO	TEXTURA			
			GRUESA	MEDIA	FINA	MUY FINA
SEDIMENTARIA	Clásicas		Conglomerados* (21+3) Brechas (19+5)	Arenisca 17+4	Limolita 7+2 Grauvacas (18+3)	Lutita 4+2 Pizarra (Shale) (6+2) Marga (7+2)
	No Clásicas	Carbonatadas	Caliza Cristalina (12+3)	Caliza Esparítica (10+2)	Caliza Micrítica (9+2)	Dolomita (9+3)
		Evaporitas		Yeso 8+2	Anhidrita 12+2	
		Orgánicas				Creta 7+2
METAMÓRFICA	No Foliadas		Mármol 9+3	Hornfels (19+4) Meta-arenisca (19+3)	Cuarcitas 20+3	
	Débilmente foliadas		Migmatita (29+3)	Anfibolita 26+6		
	Foliadas**		Gneis 28+5	Esquisto 12+3	Filita (7+3)	Pizarra (slate) 7+4
ÍGNEA	Plutónicas	Félsicas	Granito 32+3 Granodiorita (29+3)	Diorita 25+5		
		Máficas	Gabro 27+3 Norita 20+5	Dolerita (16+5)		
	Hipabisales		Porfíricas (20+5)		Diabasa (15+5)	Peridotita (25+5)
	Volcánicas	Lávicas		Riolita (25+5) Andesita 25+5	Dacita (25+3) Basalto (25+5)	Obsidiada (19+3)
		Piroclásticas	Aglomerado (19+3)	Brecha (19+5)	Toba (13+5)	

*Los conglomerados y las brechas pueden presentar un variado rango de valores "mi" dependiendo de la naturaleza del material cementante y el grado de cementación, así que pueden variar de rangos de arenisca a valores usados para sedimentos finos.

**Estos valores son de especímenes de roca intacta evaluados normalmente en la estratificación o foliación. El valor de "mi" será significativamente diferente si el fallamiento ocurre a lo largo de un plano de debilidad.

Tabla 8. Guías para la estimación del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek & Brown, D. Extraída de Hoek et al., 2002.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.	D=0
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo circundante Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance. La alteración puede ser severa a menos que se coloquen una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la figura.	D=0 D=0.5 No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 metros en el macizo rocoso circundante.	D=0.8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil y geotécnica dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la alteración de tensión resulta en alguna alteración.	D=0.7 Good blasting D=1.0 Poor blasting
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al resistir el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.	D=1.0 Production blasting D=0.7 Mechanical excavation

2.2.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando estos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir el coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costes de ejecución, consecuencias o riesgos que podría causar la rotura, etc. (González de Vallejo, 2004).

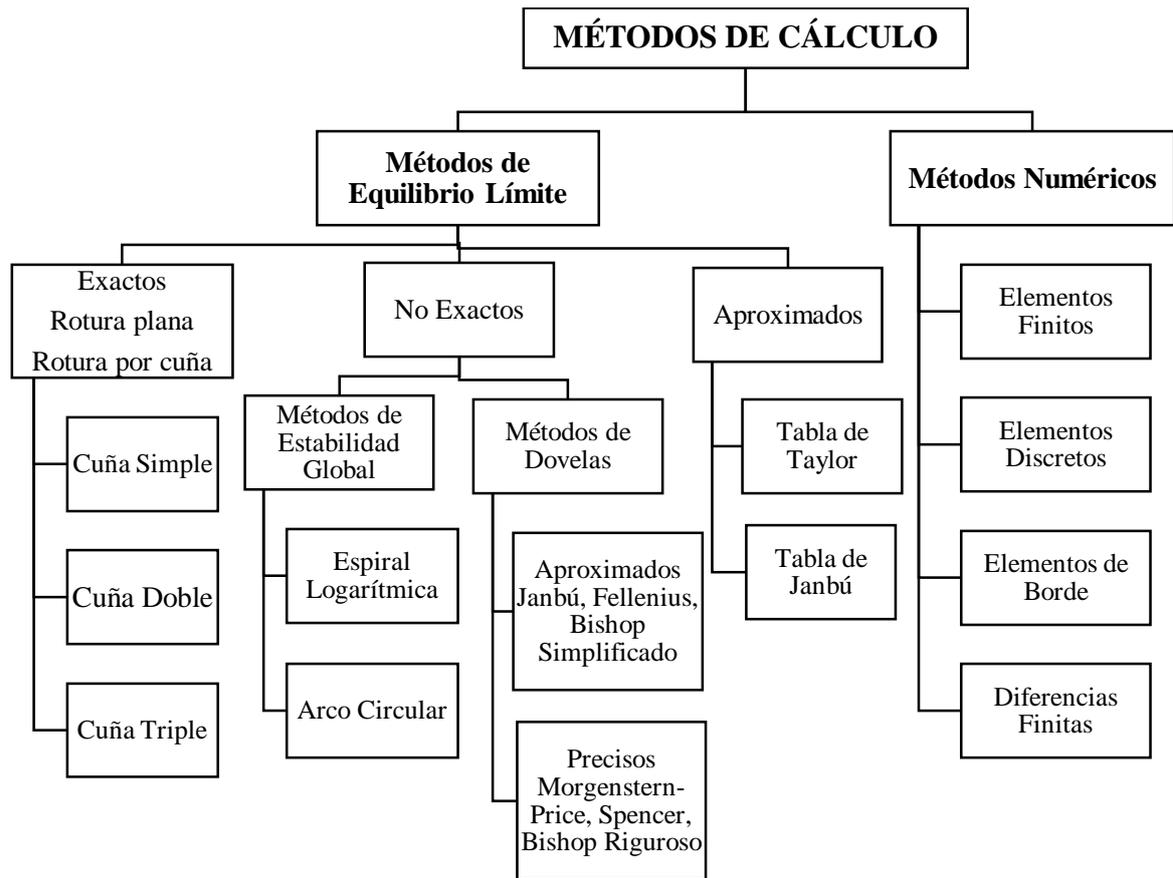


Figura 4. Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Suárez, 2007).

2.2.4.1 Métodos del Equilibrio Límite

Los métodos de equilibrio límite analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. Se basan en:

- La selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
- El criterio de rotura de Mohr-Coulomb.
- La definición de coeficiente de seguridad.

Los problemas de estabilidad son estáticamente indeterminados, y para su resolución es preciso considerar una serie de hipótesis de partida diferentes según los métodos. Así mismo se asumen las siguientes condiciones:

- La superficie de rotura debe ser postulada con una geometría tal que permita que ocurra el deslizamiento, es decir, será una superficie cinemáticamente posible.
- La distribución de las fuerzas actuando en la superficie de rotura podrá ser computada utilizando datos conocidos (peso específico del material, presión de agua, etc.).
- La resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura.

Con estas condiciones se establecen las ecuaciones del equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento y las resistentes. Los análisis proporcionan el valor del coeficiente de seguridad del talud para la superficie analizada, referido al equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan. Es decir, el coeficiente F por el que deben dividirse las fuerzas tangenciales resistentes (o multiplicarse las fuerzas de corte desestabilizadoras) para alcanzar el equilibrio estricto (González de Vallejo, 2004).

a) Método de Dovelas

En la mayoría de los métodos con fallas curvas o circulares, la masa de la parte superior de la superficie de falla se divide en una serie de tajadas verticales. El número de tajadas depende de la geometría del talud y de la precisión requerida para el análisis. Entre mayor sea el número de tajadas, se supone que los resultados serán más precisos. En los procedimientos de análisis con tajadas, generalmente se considera el equilibrio de momentos con relación al centro del círculo para todas y cada una de las tajadas.

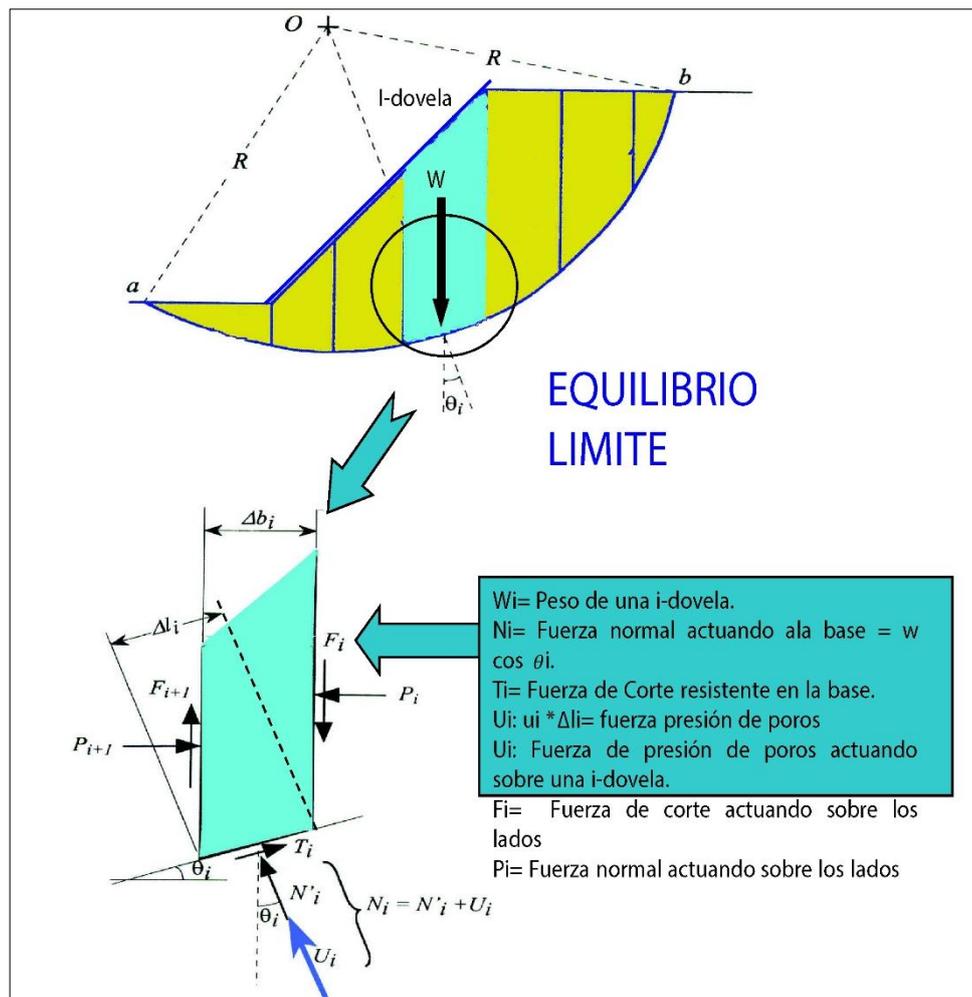


Figura 5. Esquema del Método Equilibrio Límite (Luis Paredes, 2010).

Las fuerzas que actúan sobre cada dovela deben encontrarse en equilibrio, tanto para cada dovela, como para la totalidad de la masa deslizante. Algunos métodos consideran sólo equilibrio de fuerzas, otros sólo de momento y otros satisfacen ambas fuerzas. Las hipótesis del Método de Equilibrio Límite son:

- El suelo sigue una ley de comportamiento Mohr-Coulomb: $\tau = c + \sigma'_n \tan(\phi')$ y la resistencia se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de deslizamiento.
- El Factor de Seguridad (FS) de la componente cohesiva y friccionante del material es igual para todos los suelos involucrados en la superficie de deslizamiento y es el mismo para todas las dovelas.

Tabla 9. Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Suárez, 2007).

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Los factores de seguridad son bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Establece el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	El método es similar al método 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.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad.
Elementos finitos	Cualquier forma de la superficie de falla.	Analiza esfuerzos y deformaciones.	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.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

- **Factor de Seguridad**

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F.S = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al cortante}}$$

En las superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F.S = \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento actuante}}$$

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Estabilidad: Condición de estabilidad de un talud o ladera (GEMMA, 2007).

Factor de seguridad: Es la resistencia global frente a cargas externas que tiene el macizo rocoso antes de sufrir deformaciones permanentes en su estructura (González de Vallejo, 2004).

Factores geológicos: Son la estratigrafía, litología y estructuras geológicas de un talud (González de Vallejo, 2004).

Factores geométricos: Determinan la altura e inclinación de un talud (González de Vallejo, 2004).

Factores geomecánicos: Determinan el comportamiento mecánico del terreno (González de Vallejo, 2004).

Macizo rocoso: Es el conjunto de bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso; mecánicamente son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos (González de Vallejo, 2004).

Roca: Agregado natural compuesto de partículas de uno o más minerales, con fuertes uniones cohesivas (GEMMA, 2007).

Talud: Superficie artificial inclinada de un terreno que se forma al cortar una ladera (GEMMA, 2007).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Geográficamente la carretera se encuentra ubicada al NW de la ciudad de Chota, en el cuadrángulo de Chota (14-f) con una extensión de 3.25 km, con coordenadas UTM - WGS84, tramo de la carretera Chota – Chongoyape, detallado en el plano 01.

Tabla 10. Coordenadas UTM - WGS84 del tramo a estudiar.

Tramo	Kilometro	Este	Norte	Altitud
Punto de Inicio: Lajas	Km 141.50	749956	9274170	2138 m.s.n.m
Punto Final: Ajipampa	Km 138.25	743794	9275290	2078 m.s.n.m

Políticamente se ubica en:

- País: Perú
- Departamento: Cajamarca
- Provincia: Chota
- Distrito: Lajas

3.2 ACCESIBILIDAD

El acceso al tramo de estudio, es a través de la carretera asfaltada Cajamarca - Chota, con una distancia promedio de 129 km, un tiempo de 3 horas en automóvil; y se continúa con la ruta de acceso Chota – Lajas – Ajipampa.

Tabla 11. Acceso a la zona de estudio.

Ruta terrestre	Distancia	Estado	Tiempo
Cajamarca - Chota	129 Km	Asfaltada	3 horas
Chota - Lajas	9.4 Km	Asfaltada	30 minutos
Lajas - Ajipampa	3.25 Km	Asfaltada	15 minutos

3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1 TIPO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Por el tipo de investigación, es descriptiva y explicativa no experimental y transversal en el tiempo. Inicia con la observación para establecer el método de investigación Lógico – Inductivo.

3.3.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO

3.25 km de la Carretera Lajas – Ajipampa.

3.3.3 MUESTRA

Taludes de la carretera Lajas – Ajipampa con posible inestabilidad.

3.3.4 UNIDAD DE ANÁLISIS

Caracterización de los factores geométricos, geológicos y geomecánicos para analizar la estabilidad de taludes.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1 TÉCNICAS:

- Revisión bibliográfica.
- Interpretación de imágenes satelitales.
- Recolección de información mediante tablas geomecánicas.
- Ensayos geomecánicos de campo.
- Proceso de información de propiedades geomecánicas en el software RocData.
- Análisis mediante software Dips, RocPlane y Slide.

3.4.2 INSTRUMENTOS Y MATERIALES

- Brújula Brunton Azimutal
- GPS Garmin eTrex 20
- Picota de geólogo
- Flexómetro de 5m
- Lápiz de dureza
- Libreta de geólogo
- Cámara digital

- Laptop
- Tablas geomecánicas

3.4.3 SOFTWARES

- ArcMap 10.5
- AutoCAD CIVIL 3D 2016
- Dips v7
- Slide v7
- RocData v5
- RocPlan v3
- Microsoft Office 2013

3.5 PROCEDIMIENTO Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.5.1 PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO EN CAMPO

- Se realiza la recopilación y análisis de teorías relacionadas con el problema de investigación, para determinar los datos a recopilar en campo.
- A través del Google Earth se identifican los posibles taludes a estudiar.
- Se elaboran los planos básicos de ubicación y geológico, este último con la data de la carta 14-f (Chota) tomado del INGEMMET.
- En base al modelo digital de elevaciones (MED) se diseñan el plano topográfico y de pendientes.

Tabla 12. Distribución de pendientes del área de investigación, ver plano N° 04.

PENDIENTES (°)	TERRENO	ÁREA (Has)	PORCENTAJE (%)
<1	Llano	0.02	0.01
1-5	Inclinado con suave pendiente	3.19	2.44
5-15	Pendiente moderada	35.35	27.10
15-25	Pendiente fuerte	32.82	25.16
25-45	Pendiente escarpada	55.36	42.43
>45	Terrenos muy escarpados	3.72	2.85

3.5.2 RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO

- **Geología:** En concordancia con el plano N° 06, las unidades lito-estratigráficas cartografiadas en el área de estudio se detallan a continuación:

Tabla 13. Distribución de unidades lito-estratigráficas en la carretera Lajas – Ajipampa.

UNIDAD	SIMBOLOGÍA	ÁREA (Has)	PORCENTAJE (%)
Depósito Fluvial	Qh-fl	14.33	10.98
Depósito Deluvial	Qh-de	3.96	3.04
Depósito Coluvial	Qh-co	5.46	4.19
Depósito Aluvial	Qh-al	6.52	5.00
Fm. Cajamarca	Ks-ca	35.76	27.41
Fm. Quilquiñan-Mujarrún	Ks-qm	8.78	6.73
Fm. Pulluicana	Ks-p	51.02	39.11
Fm. Pariatambo	Ki-pa	4.62	3.54

Formación Pariatambo (Ki-pa): Aflora en la comunidad de Ajipampa, en el Km. 138.25 de la carretera Chongoyape - Chota; su litología consiste en intercalaciones de calizas negras, bituminosas y de olor fétido con delgadas capas de lutitas negras y bituminosas; se caracteriza por ser bastante fosilífera.



Foto 1. Calizas bituminosas de la Formación Pariatambo, coordenadas: E 747422, N 9275285, Cota 2080 m.s.n.m.

Formación Pulluicana (ks-p): Aflora en el Km. 138.5 hasta el Km. 140; litológicamente predomina una caliza arcillosa, grisácea, que se intemperiza a crema o marrón claro y que se presenta en capas medianas, nodulares e irregularmente estratificadas; intercaladas con capas de margas marrones y lutitas grisáceas o verdosas, así como algunas capas de limolitas y areniscas.



Foto 2. Intercalaciones de calizas intemperizadas con lutitas grisáceas del Formación Pulluicana, coordenadas: E 748697, N 9274817, Cota 2113 m.s.n.m.

Formación Quilquiñan - Mujarrún (ks-qm): Se encuentran pequeños afloramientos en el Km. 140.5; se caracteriza por su variedad de fauna fosilífera, y se compone de lutitas deleznales gris oscuras y margas azuladas en capas delgadas que intemperizan a marrón oscuro o marrón rojizo con intercalación de calizas generalmente delgadas y escasas.



Foto 3. Afloramiento de la Formación Quilquiñan – Mujarrún, coordenadas: E 749107, N 9274692, Cota 2115 m.s.n.m.

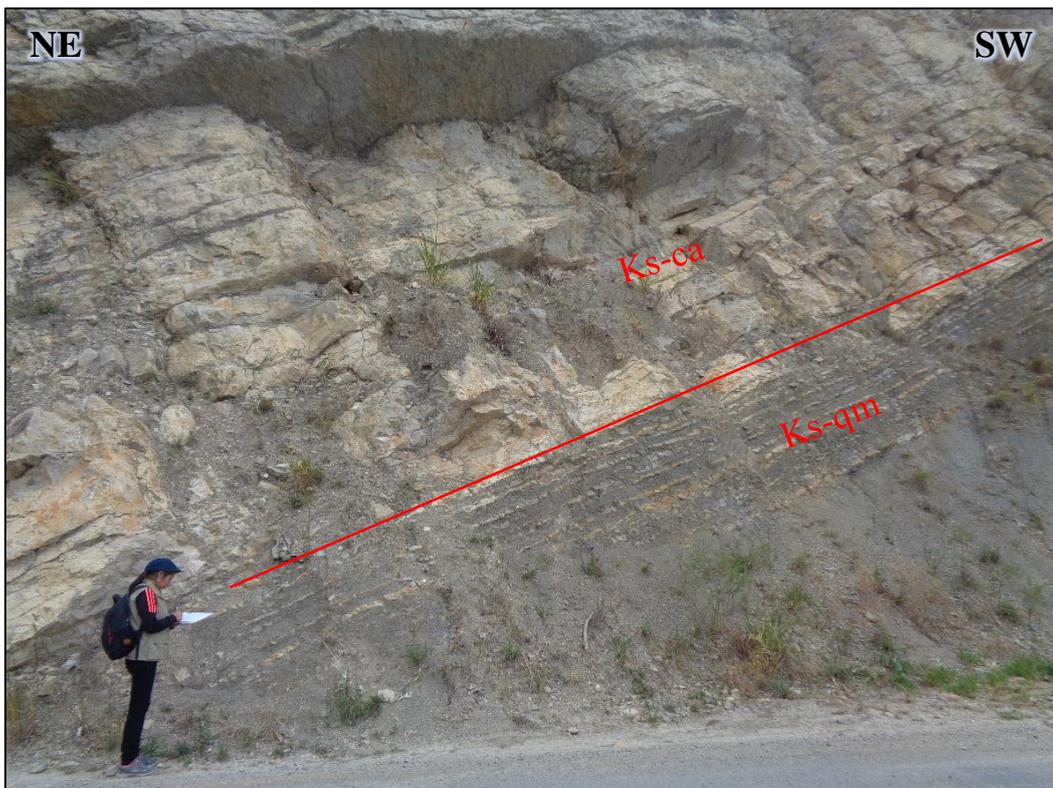


Foto 4. Contacto litológico ks-ca/ks-qm, coordenadas: E 748697, N 9274825, Cota 2117 m.s.n.m.

Formación Cajamarca (ks-ca): Aflora en Lajas, en el Km. 141; tiene una litología bastante uniforme, estratificada en capas medianas, que consiste en una caliza fina y pura, color marrón claro que intemperiza a tonos blanquecinos o gris claros.



Foto 5. Calizas bien estratificadas de la Formación Cajamarca.

Depósitos Cuaternarios: Los taludes fueron diseñados en suelos coluviales (Qh-co), aluviales (Qh-al), deluviales (Qh-de) y fluviales (Qh-flu) que consisten en gravas, arena y limos en una matriz arcillosa.



Foto 6. Depósitos cuaternarios coluviales, coordenadas: E 747465, N 9275279, Cota 2080 m.s.n.m.



Foto 7. Depósitos cuaternarios fluviales generados por el Río Chotano.

- **Recopilación de datos en un registro geológico – geomecánico**

Para registrar las propiedades geomecánicas de los taludes de suelos se utiliza la tabla del Anexo A.1., con el objetivo de conocer sus propiedades ingenieriles en base a la clasificación SUCS.

El registro de las propiedades geomecánicas de los taludes de roca utiliza la tabla del Anexo A.2. como base a los sistemas de clasificación geomecánicos y la documentación de las variables del sistema de Hoek-Brown (Hoek, 2007), necesario para calcular las variables de entrada para el análisis de estabilidad con los softwares.

- **Ensayos geomecánicos en campo**

Para los análisis de rocas se realizaron ensayos a la roca intacta de los macizos rocosos, para identificar la resistencia a la compresión uniaxial.

3.5.3 TRATAMIENTO DE DATOS

3.5.3.1 Descripción de las estaciones geomecánicas

En la carretera Lajas – Ajipampa se documentaron 15 estaciones, se presentan taludes de cuyo material son macizos rocosos, suelos, suelos – macizo rocoso y muros de contención, detallado en la tabla 14.

Tabla 14. Estaciones documentadas en la carretera Lajas – Ajipampa.

ESTACIÓN (N°)	COORDENADAS UTM-WGS84			TIPO DE MATERIAL
	ESTE	NORTE	COTA	
1	749936	9274179	2134	Macizo Rocoso
2	749856	9274241	2141	Suelos - Macizo Rocoso
3	749842	9274278	2153	Suelos - Macizo Rocoso
4	749764	9274322	2139	Macizo Rocoso
5	749726	9274358	2148	Suelos- Macizo Rocoso
6	749666	9274407	2442	Macizo Rocoso
7	749300	9274825	2117	Macizo Rocoso
8	748697	9274817	2113	Macizo Rocoso
9	748501	9275100	2103	Muro de Contención
10	748209	9275135	2088	Macizo Rocoso
11	748020	9275209	2089	Suelos - Macizo Rocoso
12	747903	9275220	2087	Macizo Rocoso
13	747585	9275235	2077	Muro de Contención
14	747511	9275258	2077	Suelos - Macizo Rocoso
15	747465	9275279	2080	Suelos

Tabla 15. Estación N° 01 en la Formación Cajamarca.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	30			Macizo rocoso de la formación Cajamarca, presenta calizas bien estratificadas con un GSI = 70.
Pie (m)	9			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	313	313	
Dip	0	77	30	
				

Tabla 16. Estación N° 02 talud de depósitos deluviales – calizas de la Formación Cajamarca.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	30			El tipo de material del talud son depósitos deluviales (suelos CH = arcillas inorgánicas de alta plasticidad) y calizas de la Formación Cajamarca.
Pie (m)	9			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	323	349	
Dip	0	70	41	
				

Tabla 17. Estación N° 03 talud de depósitos fluviales – calizas de la Formación Cajamarca.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	15			Los materiales son depósitos fluviales (suelos GW = gravas bien graduadas con arenas y pocos finos) y calizas de la Formación Cajamarca.
Pie (m)	10			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	325	310	
Dip	0	55	1	
				

Tabla 18. Estación N° 04 talud en calizas de la formación Cajamarca.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	30			El diseño del talud realizado en calizas de la formación Cajamarca presenta evidente rotura planar.
Pie (m)	20			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	310	-	
Dip	0	55	-	
				

Tabla 19. Estación N° 05 en la Formación Cajamarca.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	8			El talud está conformado por depósitos deluviales y calizas ligeramente intemperizadas de la formación Cajamarca.
Pie (m)	15			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	315	315	
Dip	0	86	50	
				

Tabla 20. Estación N° 06 registrada en la formación Cajamarca.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	30			Estación registrada en la formación Cajamarca, se evidencia rotura planar en los estratos de calizas.
Pie (m)	12			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	312	340	
Dip	0	60	32	
				

Tabla 21. Estación N° 07 en la Formación Cajamarca.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	8			Macizo rocoso de la formación Cajamarca, presenta calizas bien estratificadas sin ninguna falla evidente, con un GSI = 75.
Pie (m)	5			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	207	-	
Dip	0	79	-	
				

Tabla 22. Estación N° 08 macizo rocoso homogéneo - Formación Pulluicana.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	30			Macizo rocoso homogéneo, calizas ligeramente intemperizadas de la Formación Pulluicana.
Pie (m)	35			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	340	350	
Dip	0	57	22	
				

Tabla 23. Estación N° 09 muro de gravedad.

Geometría del muro de contención		Descripción
Altura (m)	3.50	
Longitud (m)	15	
Ancho de la base (m)	0.60	
Dirección del muro		
Azimut (Z)	75	
Dip	85	

Muro de contención (muro de gravedad), conteniendo depósitos coluviales (suelos GP-GC = gravas mal graduadas con arenas y gravas arcillosas con arenas).



Tabla 24. Estación N° 10 macizo rocoso – Formación Pulluicana.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	12			
Pie (m)	15			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	280	280	
Dip	0	78	40	

El macizo rocoso presenta calizas micríticas y esparíticas perteneciente a la Formación Pulluicana.



Tabla 25. Estación N° 11 depósitos deluviales – Formación Pulluicana.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	10			El talud está conformado por depósitos deluviales (suelos tipo CH = arcillas inorgánicas de alta plasticidad) y calizas de la Formación Pulluicana.
Pie (m)	40			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	290	-	
Dip	0	62	-	
				

Tabla 26. Estación N° 12 macizo rocoso – formación Pulluicana.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	30			Macizo rocoso homogéneo (calizas esparíticas) de la formación Pulluicana.
Pie (m)	20			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	270	270	
Dip	0	57	45	
				

Tabla 27. Estación N° 13 muro de gaviones.

Geometría de los gaviones		Descripción
Altura (m)	0.80	Depósitos coluviales contenidos en un muro de gaviones de dos niveles.
Longitud (m)	30	
Ancho (m)	0.45	
		

Tabla 28. Estación N° 14 depósitos deluviales – formación Pariatambo.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	15			El talud está conformado por depósitos deluviales (suelos tipo CH) provenientes de la formación Pariatambo.
Pie (m)	12			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	295	295	
Dip	0	58	43	
				

Tabla 29. Estación N° 15 depósitos coluviales.

Geometría del talud				Descripción
Altura (m)	45			Depósitos coluviales, presenta suelos tipo GP - GC correspondiente a gravas mal graduadas, gravas arcillosas con mezclas de arenas).
Pie (m)	15			
Dirección	Pie	Talud	Cabeza	
Azimut (Z)	0	290	290	
Dip	0	50	45	

E
W



3.5.4 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS

Generación de perfiles en cada estación: Con un modelo digital de elevaciones (MDE) de la fuente SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), a un detalle de 30m se crean curvas de nivel a 1m con el software ArcGIS 10.5; posteriormente las curvas generadas son importadas al software AutoCAD CIVIL 3D 2016, para ser convertidas en una superficie y crear los perfiles, teniendo cuenta la presencia de vías y/o drenajes en el modelo.

Tabla 30. Ubicación y propiedades de los perfiles realizados en cada estación.

PERFIL	LONGITUD (m)	COORDENADAS UTM-WGS84			TIPOS DE MATERIALES
		PUNTO	ESTE	NORTE	
1-1'	100.00	1	749902.341	9274135.125	Macizo rocoso con falla planar evidente
		1'	749963.356	9274214.353	
2-2'	100.00	2	749820.529	9274203.434	Suelo - Roca
		2'	749886.899	9274278.233	
3-3'	100.00	3	749792.962	9274233.628	Suelo - Roca
		3'	749866.615	9274301.268	
4-4'	100.00	4	749730.742	9274289.454	Macizo rocoso con falla planar evidente
		4'	749801.257	9274360.359	
5-5'	100.00	5	749687.999	9274321.302	Suelo - Roca
		5'	749758.230	9274392.489	
6-6'	100.00	6	749629.364	9274367.826	Macizo rocoso con falla planar evidente
		6'	749695.110	9274443.176	
7-7'	100.00	7	749343.968	9274792.906	Macizo rocoso sin falla evidente
		7'	749263.257	9274851.945	
8-8'	100.00	8	748642.043	9274790.909	Macizo rocoso homogéneo
		8'	748731.633	9274835.333	
9-9'	100.00	9	748483.984	9275048.785	Suelos - Muro de contención
		9'	748514.229	9275144.101	
10-10'	100.00	10	748202.507	9275083.289	Macizo rocoso homogéneo
		10'	748214.024	9275182.623	
11-11'	100.00	11	747999.364	9275144.227	Suelos - Macizo rocoso
		11'	748029.044	9275239.721	
12-12'	100.00	12	747895.869	9275169.273	Macizo rocoso homogéneo
		12'	747908.853	9275268.427	
13-13'	100.00	13	747570.563	9275181.722	Suelos - Muro de contención
		13'	747592.810	9275279.215	
14-14'	100.00	14	747491.454	9275205.995	Suelos - Macizo rocoso
		14'	747526.162	9275299.778	
15-15'	100.00	15	747442.975	9275227.155	Suelos
		15'	747480.378	9275319.896	

La base de los materiales geológicos de los taludes documentada en campo, se procesa en el software RocData v5 para obtener las de propiedades geomecánicas.

La base de la clasificación de los materiales geológicos de los taludes documentados en el registro geológico – geotécnico en campo, se utiliza para procesar la información de propiedades en el software RocData v5; caracterizando cuatro tipos de materiales: macizos rocosos, suelos, discontinuidades y muros de contención.

Tabla 31. Macizos rocosos, utiliza el criterio de rotura de Hoek-Brown.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Unidad Geológica		
			Ki-pa	Ks-p	Ks-ca
Clasificación Hoek-Brown	sigci	MPa	35	35	75
	GSI	-	40	45	70
	mi	-	9	10	10
	D	-	0.7	0.7	0.7
	Ei	MPa	24500	24500	52500
	MR	-	700	700	700
Criterio Hoek-Brown	mb	-	0.333045	0.487048	1.92367
	s	-	0.00016731	0.00034533	0.0129349
	a	-	0.511368	0.508086	0.501355
Rango de envoltura de rotura	Aplicación	-	Taludes	Taludes	Taludes
	sig3max	MPa	0.942039	0.960386	1.10564
	Peso específico	MN/m3	0.0245	0.0245	0.0245
	Peso específico saturado	MN/m3	0.0260	0.0260	0.0261
	Altura promedio	m	50	50	50
	Ajuste Mohr-Coulomb	c	MPa	0.225298	0.269578
	phi	degrees	34.8769	38.1844	52.2396
Parámetros del Macizo Rocosos	sigt	MPa	-0.017583	-0.0248158	-0.504306
	sigc	MPa	0.410108	0.609808	8.47977
	sigcm	MPa	2.54635	3.15497	15.0879
	Erm	MPa	1426.64	1917.33	17724.8
Tipo de material	Mogi	-	Frágil	Frágil	Frágil

Tabla 32. Suelos, emplea el criterio de rotura de Mohr - Coulomb.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Qh-co	Qh-de	Qh-fl
Tipo de Depósito	-	-	Coluvial	Deluvial	Fluvial
Tipo de suelo	SUCS	-	GP-GC	CH	GW
Peso específico	Seco	KN/m3	20	16.5	21
	Saturado	KN/m3	25	21.5	23
Criterio de Mohr - Coulomb	Cohesión	kPa	12.5	15	25
	Ángulo de fricción	grados	38	22	40
	Resistencia tensional	kPa	0	0	0
	Resistencia a la compresión uniaxial	kPa	51.2576	44.4768	107.225
	alpha	grados	76.619	65.5363	77.7324
Tipo de material	Mogi	-	Frágil	Dúctil	Frágil

Tabla 33. Discontinuidades, se utilizó el criterio de rotura de Barton - Bandis:

Propiedad	Parámetro	Unidad	Ks-ca disct
Tipo de discontinuidad	-	-	Estrato
Criterio de Barton-Bandis	Ángulo de fricción básico	grados	38
	Coeficiente de rugosidad JRC	-	15
	Resistencia compresiva JCR	Mpa	75
Rango de envoltura de rotura	Aplicación	-	Taludes
	sig3max	MPa	2.4841
	Peso específico del material	MN/m3	0.0245
	Altura promedio	m	50
Ajuste Mohr-Coulomb	c	MPa	0.801646
	phi	grados	55.3569
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

Tabla 34. Muros de contención, se utiliza el modelo de resistencia infinita:

Propiedad	Parámetro	Unidad	M. Gravedad	M. Gaviones
Tipo de muro	-	-	Muro de Gravedad	Muro de Gaviones
Peso específico	Seco	KN/m3	23	22
	Saturado	KN/m3	23.5	25
Resistencia	T	KPa	∞	∞

3.5.5 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

3.5.5.1 Descripción del método

- Se realizan tres tipos de análisis, según el comportamiento de los materiales, detallados en la siguiente tabla.

Tabla 35. Clasificación de los análisis, según el comportamiento de los materiales.

TIPO DE MATERIALES	PERFILES	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	SOFTWARE UTILIZADO
Macizo rocoso sin comportamiento de falla evidente	7-7'	Estereográfico-Cinemático	Dips v7
Macizo rocoso con falla planar evidente	1-1', 4-4', 6-6'	Equilibrio límite (fallas planares)	RocPlane v3
Suelos	15-15'		
Suelos - Macizo Rocosos	2-2', 3-3', 5-5', 14-14'		
Macizo Rocosos homogéneo (GSI<60)	8-8', 10-10', 11-11', 12-12'	Equilibrio límite (fallas rotacionales-dovelas)	Slide v7
Suelos - Muro de Contención	9-9', 13-13'		

- Las licencias de los softwares de análisis utilizados en la investigación (RocData v5, Dips v7, RocPlane v3 y Slide v7), forman parte del convenio UNC-ROSCIENCE.
- El análisis con el software Dips, utilizó la proyección de Wulf (igual-ángulo), recomendable para análisis cinemáticos.
- Los análisis con el software RocPlane, utilizó el método determinístico para calcular el factor de seguridad.
- Para el análisis con el software Slide, se tuvo en consideración los siguientes términos:
 - Los métodos de dovelas utilizados fueron los que realizan equilibrio de fuerzas y momentos: LE/Morgenstern-Price, Spencer y Sarma.
 - El número de dovelas por superficie de análisis fue de 50, tolerancia de 0.005 y 75 máximas iteraciones
 - El método de búsqueda de la falla crítica fue de “Auto Refine Search”.

3.5.5.2 Escenarios de análisis

- Se realizó el análisis de taludes en cinco (5) escenarios que se describen en la siguiente tabla.

Tabla 36. Descripción de escenarios para el análisis de taludes.

Análisis	Escenario	Kh	Kv	Nivel Freático	Descripción
1	Natural	0	0	Ausente	Estado en condiciones drenadas estáticas
2	Saturación parcial	0	0	Profundidad media del material crítico	Condiciones de lluvias intensas
3	Saturación total	0	0	Superficie del terreno	Condiciones de lluvias extraordinariamente intensas
4	Sismicidad máxima	0.188	0.094	Ausente	Máximas aceleraciones sísmicas en la zona
5	Sismicidad máxima y saturación parcial	0.188	0.094	Altura media del material crítico	Combinación de las condiciones 2 y 4

- La gravedad fue constante en todos los escenarios (9.81m/s²).
- Para el análisis de máxima sismicidad (análisis pseudo - estático) se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:
 - **Zona sísmica:** 2
 - **Máxima aceleración sísmica (gals):** 0.25
 - **Coefficiente de amplificación topográfica:** 1.2 (laderas mayores a 30m).
 - **Perfil estratigráfico del terreno:** B=1.25 (suelos competentes y/o macizos rocosos meteorizados).
 - **Amplificación estratigráfica “Kh”:** 0.188
 - **Parámetro de zona “Kv”:** 0.094
 - Para el software RocPlane se convirtió estos coeficientes a un vector:
 - **Ángulo de la fuerza sísmica:** -27°
 - **Fuerza sísmica:** 0.69MN/m
- Para el análisis de resultados, se utiliza los rangos de factores de seguridad recomendados por Hoek (2007).

Tabla 37. Rangos de factores de seguridad recomendados por Hoek (2007).

FACTOR DE SEGURIDAD	
Inestable	<1.0
Estable relativo	1.0-1.3
Estable a corto plazo	1.3-1.5
Estable a largo plazo	>1.5

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS

4.1.1 ANÁLISIS ESTEREOGRÁFICO - CINEMÁTICO

El análisis muestra probabilidad nula de ocurrencia de deslizamientos planares o volcamientos flexurales; muy baja probabilidad de ocurrencia de deslizamiento en cuña; y baja probabilidad de volcamiento directo.

Tabla 38. Análisis estereográfico - cinemático del perfil 7-7'.

PERFIL	ESCENARIO	%
7-7'	Deslizamiento planar	0.000
	Deslizamiento en cuña	3.640
	Volcamiento flexural	0.000
	Volcamiento directo	16.360

4.1.2 ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE (DESLIZAMIENTOS PLANARES)

Los perfiles 1-1', 4-4' y 6-6' (perfiles con evidente potencial de deslizamiento planar) fueron analizados por el método de equilibrio límite de dos dimensiones con el software RocPlane v3.

- Se puede discernir que:
 - Las zonas de los perfiles 1-1' y 4-4' muestran estados estables excepto frente a saturación total.
 - La zona del perfil 6-6' solo es estable en estado natural y de sismicidad máxima, siendo inestable en cualquier estado de saturación.
 - Se puede concluir que los taludes serán estables mientras se evite condiciones de saturación.

Tabla 39. Análisis de equilibrio límite (deslizamientos planares) de los perfiles 1-1', 4-4' y 6-6'.

PERFIL	ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD
1-1'	Estado Natural	3.360
	Saturación Parcial	2.370
	Saturación Total	0.000
	Sismicidad Máxima	2.390
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.640
4-4'	Estado Natural	3.920
	Saturación Parcial	1.970
	Saturación Total	0.000
	Sismicidad Máxima	2.780
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.350
6-6'	Estado Natural	4.400
	Saturación Parcial	0.200
	Saturación Total	0.000
	Sismicidad Máxima	3.080
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.080

4.1.3 ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE (DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES)

- Los resultados del análisis de los perfiles con evidente potencial de deslizamiento rotacional fueron analizados por el método de equilibrio límite de dos dimensiones con el software Slide v7, se presentarán los resultados según los tipos de materiales críticos que conformaban los perfiles.
- Perfiles conformados por suelos:
 - El perfil 15-15' es estable solo en estado natural.

Tabla 40. Análisis de equilibrio límite (deslizamientos rotacionales) del perfil 15-15'.

PERFIL	ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD - MÉTODO			
		GLE/Morgenster-Price	Spencer	Sarma	Promedio
15-15'	Estado Natural	1.052	1.047	1.049	1.049
	Saturación Parcial	0.546	0.540	0.540	0.542
	Saturación Total	0.413	0.413	0.413	0.413
	Sismicidad Máxima	0.779	0.777	0.776	0.777
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.396	0.393	0.395	0.395

- Perfiles conformados por suelos - macizos rocosos:
 - Los perfiles 2-2', 5-5' y 14-14' están estables a largo plazo en condiciones naturales; están estables relativos y estables a corto plazo frente a saturación parcial y sismicidad máxima; pero son inestables en saturación total y en sismicidad máxima con saturación parcial.
 - El perfil 3-3' solo es estable en estado natural.

Tabla 41. Análisis de perfiles conformados por material tipo suelos - macizos rocosos.

PERFIL	ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD - MÉTODO			
		GLE/Morgenster-Price	Spencer	Sarma	Promedio
2-2'	Estado Natural	1.644	1.647	1.643	1.645
	Saturación Parcial	1.351	1.348	1.344	1.348
	Saturación Total	0.980	0.976	0.974	0.977
	Sismicidad Máxima	1.211	1.209	1.210	1.210
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.990	0.987	0.986	0.988
3-3'	Estado Natural	1.032	1.032	1.034	1.033
	Saturación Parcial	0.873	0.875	0.874	0.874
	Saturación Total	0.617	0.618	0.618	0.618
	Sismicidad Máxima	0.893	0.892	0.896	0.894
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.760	0.755	0.755	0.757
5-5'	Estado Natural	1.505	1.506	1.506	1.506
	Saturación Parcial	1.258	1.257	1.254	1.256
	Saturación Total	0.885	0.879	0.877	0.880
	Sismicidad Máxima	1.101	1.094	1.096	1.097
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.911	0.908	0.909	0.909
14-14'	Estado Natural	1.610	1.609	1.610	1.610
	Saturación Parcial	1.337	1.336	1.332	1.335
	Saturación Total	0.949	0.953	0.953	0.952
	Sismicidad Máxima	1.194	1.199	1.195	1.196
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.997	0.995	0.990	0.994

- Perfiles conformados por macizos rocosos homogéneos:
 - Todos los perfiles son estables en cualquier escenario (salvo el perfil 10-10' frente a saturación total).

Tabla 42. Análisis de perfiles conformados por macizos rocosos homogéneos.

PERFIL	ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD - MÉTODO			
		GLE/Morgenster-Price	Spencer	Sarma	Promedio
8-8'	Estado Natural	2.148	2.138	2.140	2.142
	Saturación Parcial	1.442	1.421	1.440	1.434
	Saturación Total	1.077	1.053	1.091	1.074
	Sismicidad Máxima	1.641	1.614	1.624	1.626
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.098	1.056	1.094	1.083
10-10'	Estado Natural	3.010	2.931	2.802	2.914
	Saturación Parcial	2.361	2.248	2.453	2.354
	Saturación Total	0.806	0.818	0.812	0.812
	Sismicidad Máxima	2.351	2.361	2.225	2.312
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.697	1.690	1.657	1.681
11-11'	Estado Natural	1.667	1.669	1.670	1.669
	Saturación Parcial	1.400	1.403	1.404	1.402
	Saturación Total	1.018	1.019	1.021	1.019
	Sismicidad Máxima	1.226	1.228	1.233	1.229
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.031	1.032	1.037	1.033
12-12'	Estado Natural	2.655	2.646	2.651	2.651
	Saturación Parcial	1.932	1.915	1.935	1.927
	Saturación Total	1.515	1.488	1.521	1.508
	Sismicidad Máxima	1.976	1.953	1.969	1.966
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.447	1.416	1.440	1.434

- Perfiles conformados por suelos - muros de contención:
 - El perfil 9-9' (muro de gravedad) es estable en cualquier escenario.
 - El perfil 13-13' (muro de gaviones) solo es estable en estado natural.

Tabla 43. Análisis de perfiles conformados por suelos - muros de contención:

PERFIL	ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD – MÉTODO			
		GLE/Morgenster-Price	Spencer	Sarma	Promedio
9-9'	Estado Natural	2.319	2.320	2.431	2.357
	Saturación Parcial	1.992	1.991	2.355	2.113
	Saturación Total	1.977	1.973	1.972	1.974
	Sismicidad Máxima	1.611	1.543	2.243	1.799
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.340	1.218	2.151	1.570
13-13'	Estado Natural	1.257	1.257	1.256	1.257
	Saturación Parcial	0.973	0.971	0.972	0.972
	Saturación Total	0.582	0.577	0.575	0.578
	Sismicidad Máxima	0.925	0.926	0.925	0.925
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.719	0.715	0.714	0.716

4.2 PROPUESTA DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

De acuerdo al escenario de análisis donde se presentan taludes inestables, se propone las medidas de estabilización adecuadas; de deben diseñar e implementar canales de coronación si la inestabilidad de se presenta por saturación, y optimización de la geometría del talud (disminución de la inclinación del talud, muros de contención, etc.) si la inestabilidad se presenta por sismicidad.

Tabla 44. Propuesta de estabilización para los taludes con $FS < 1.0$.

Estaciones	Tipo de Material	Escenario de Análisis	Factor de Seguridad	Propuesta de Estabilización
1	Macizo rocoso con falla planar	Saturación Total	0.000	Diseñar canales de coronación.
2	Suelo - Roca	Saturación Total	0.977	Implementar canales de coronación.
		Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.988	
3	Suelo - Roca	Saturación Parcial	0.874	Establecer un muro de gaviones o modificar la geometría del talud hasta llegar a macizo rocoso.
		Saturación Total	0.618	
		Sismicidad Máxima	0.894	
		Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.757	
4	Macizo rocoso con falla planar	Saturación Total	0.000	Establecer canales de coronación.
5	Suelo - Roca	Saturación Total	0.880	Disminuir la pendiente del talud.
		Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.909	
6	Macizo rocoso con falla planar	Saturación Parcial	0.200	Disminuir la pendiente del talud.
		Saturación Total	0.000	
		Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.080	
10	Macizo rocoso homogéneo	Saturación Total	0.812	Disminuir el ángulo del talud e incluir mallas estáticas para evitar desprendimiento de rocas.
13	Suelos - Muro de contención	Saturación Parcial	0.972	Reforzamiento del muro de gaviones construyendo 2 o 3 niveles más.
		Saturación Total	0.578	
		Sismicidad Máxima	0.925	
		Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.716	
14	Suelos - Macizo rocoso	Saturación Total	0.952	Diseñar canales de coronación impermeabilizados.
		Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.994	
15	Suelos	Saturación Parcial	0.542	Establecer muros de gaviones en el pie del talud.
		Saturación Total	0.413	
		Sismicidad Máxima	0.777	
		Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.395	

4.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Mediante la investigación se verificó que la estabilidad de taludes en la carretera Lajas – Ajiapampa está condicionada por las características de los factores geométricos (altas pendientes, cortas dimensiones de pie de talud); en los factores geológicos las calizas y lutitas formaciones Pariatambo, Pulluicana, Quilquiñan-Mujarrún, Cajamarca se encontraban bastante fracturadas y grandes masas de depósitos cuaternarios coluviales, deluviales y fluviales; y por sus factores geomecánicos predomina los materiales frágiles sobre los dúctiles dando como resultado taludes inestables.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Los taludes de la carretera Lajas – Ajipampa; presenta una geometría variada: altura de 5m a 40m, pie de talud de 5m hasta 40m, pendientes de 40° hasta 85°; geológicamente se caracteriza por las formaciones Pariatambo, Pulluicana, Quilquiñan-Mujarrún, Cajamarca, depósitos cuaternarios coluviales, deluviales y fluviales; por sus propiedades geomecánicas son materiales frágiles y los suelos deluviales que son materiales dúctiles.
- El factor de seguridad en estado de saturación y sismicidad para taludes de macizos rocosos es estable mayor a 1.086, excepto la estación N° 06 que es inestable con un $FS=0.080$; los taludes de suelos–macizo rocosos todos son inestables con un $FS<0.988$; para los muros de gravedad el $FS=1.570$ y de gaviones el $FS=0.716$.
- Se elaboró la zonificación de estabilidad de la carretera Lajas – Ajipampa encontrando dos niveles en estado natural: taludes estables relativos y estables a largo plazo; y cuatro niveles en estado de saturación y sismicidad: inestable, estable relativo, estable a corto plazo y estable a largo plazo.
- Se propone estabilizar los taludes implementando canales de coronación, muros de gaviones y optimizando la geometría del talud.

5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos triaxiales para obtener mayor precisión en las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, porque las pruebas de resistencia cualitativas realizadas en campo pueden generar margen de error.
- Elaborar un estudio geohidrológico con la finalidad de evaluar los escenarios de drenaje o recarga del área de investigación.
- Se recomienda al Instituto Vial Provincial (IVP) – Chota su inmediata intervención para estabilizar los taludes de la Formación Cajamarca desde el Km. 140.5 hasta el Km. 141.5 de la Carretera Chongoyape - Chota, a través de la implementación de canales de coronación y optimizar su geometría; así mismo colocar un muro de gaviones para estabilizar el talud de suelos de la estación N° 15 ubicado en el Km. 138.5.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barboza, G., Zúñiga, C., & Aguilar G, O. (2015). Análisis Comparativo de Estabilidad de Taludes Mediante los Métodos de Equilibrio Límite Aplicado a Taludes o Laderas Aledañas al Cerro de la Popa, Casco Urbano de Cartagena. Cartagena, Colombia: GEOMAT.
- Dávila Burga, J. (2001). Diccionario geológico. Perú.
- Deere, D. U. (1989). Rock Quality Designation (RQD) After twenty years. Florida.
- Gavilanes, H., & Andrade, B. (2004). Introducción a la Ingeniería de Túneles. Quito-Ecuador: AIME.
- GEMMA. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas 1ra. Edición. Toronto, Canadá: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas.
- González, J. (19 de Mayo de 2006). Geotecnia. Obtenido de <http://www.jordigonzalezboada.com/geotecnia/descargas.php>
- González de Vallejo, L. (2004). Ingeniería Geológica. Madrid, España: Pearson.
- Rojas, A. & Oscátegui, L (2010). Estudio Definitivo para la Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera: Chongoyape - Cochabamba - Cajamarca, Tramo: Cochabamba - Chota". Lima, Perú: MTC.
- Hoek, E. (2007). Rock Mass Properties in Practical Rock Engineering. Toronto, Canadá: Rocscience.
- Hoek, E. (2013). Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium.
- Hoek, E., Carranza Torres, C., & Corkum, B. (2002). El criterio de rotura de Hoek - Brown - Edición 2002. Minnsesota.
- Hurtado, J. E., & Chang Chang, L. A. (1897). Mapa de areas de deslizamientos por sismos en el Perú. V Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingenieria de Cimentaciones, 11.
- Mancera, J. (2010). Tesis "Estudio para la Estabilización de Corte Ubicado en el Lado Izquierdo de la Carretera Federal N° 54 Guadalajara-Saltillo, en el Subtramo Guadalajara - Ixtlahuacán del Río, Estado de Jalisco". México D.F.: U.N.A.M.

- Marinos, P., Marinos, V., & Hoek, E. (2007). El Índice de Resistencia Geológica (GSI): Una Herramienta de Caracterización para la Evaluación de las Propiedades Ingenieriles de Macizos Rocosos. Canadá: Rocscience.
- Morales, M. (2009). Caracterización Geotécnica y Determinación de Ángulos de Talud en Yacimiento Franke. Santiago de Chile.
- Pérez, E. (2005). Estabilidad de Taludes. Cataluña: UPC.
- Sobarzo, V., Villalobos, F., & King, R. (2011). Estudio de la Estabilidad de Taludes en Roca Meteorizada de la Formación Quiriquina. Concepción, Chile: UCSC.
- Suárez, J. (2007). Deslizamientos - Análisis Geotécnico. Colombia: U. Industrial de Santander.
- Svetlana, M. (2005). Estabilidad de Taludes en Macizos Rocosos con Criterios de Rotura No Lineales y Leyes de Fluencia No Asociada. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- United States Geological Survey. (2004). Landslide Types and Processes. Virginia.
- Wilson, J. (1984). Boletín N° 38: Geología de los cuadrángulos de Jayanca (13-d), Incahuasi (13-e), Cutervo (13-f), Chiclayo (14-d), Chongoyape (14-e), Chota (14-f), Celendín (14-g), Pacasmayo (15-d) y Chepén (15-e). Lima, Perú: INGEMMET.
- Zavala, B., & Rosado, M. (2011). Riesgo Geológico en la Región Cajamarca, Boletín N° 44 Serie C. Lima, Perú: INGEMMET.

ANEXOS

A. TABLAS DE REGISTRO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

B. ANÁLISIS ROCDATA

C. ANÁLISIS DIPS

D. ANÁLISIS ROCPLANE

E. ANÁLISIS SLIDE

F. PLANOS

G. PERFILES