

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS PROFESIONAL

EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS TALUDES DE LA CARRETERA

ENCAÑADA – CELENDÍN EN EL TRAMO KM. 32+000 - KM. 46+000

Para optar el título profesional de:
INGENIERO GEÓLOGO

Presentado Por:
Bach. Yovany Marisol Caruanambo Cortéz

Asesor:
Ing. Roberto Severino Gonzales Yana

Cajamarca – Perú

2017

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Nacional de Cajamarca, a la Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica y a los docentes por sus enseñanzas para mi desarrollo profesional.

Agradezco a mi asesor Roberto Severino Gonzales Yana, por su apoyo y guía durante la realización de esta tesis.

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional y moral en cada momento de mi formación; para la realización de esta tesis.

Agradezco a mis familiares que siempre confiaron en mí, a todos mis amigos y amigas que me brindaron su apoyo, en la realización de esta tesis.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mis padres, Teófila Cortéz Colorado y Felipe Caruanambo Bautista que son mi más grande tesoro y a los familiares y amigos que me brindaron su apoyo, para la realización de esta tesis.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolló en carretera encañada – Celendín, en el distrito de la encañada, provincia y departamento de Cajamarca, en esta carretera hay tramos que presentan inestabilidad. Siendo necesario definir las características geomecánicas a lo largo de la carretera, para determinar los factores de seguridad actuales, principalmente en los tramos críticos. Se evaluó la parte geomecánica a través de tablas donde se pudieron obtener datos del macizo rocoso y propiedades de las discontinuidades para calcular el RMR (Rock Mass Rating), de cada estación geomecánica. Con objetivo de realizar la evaluación geomecánica de los taludes de la carretera en el tramo km. 32+000 - km. 46+000, para lo cual se realizaron 3 estaciones geomecánicas, en cada unidad geotécnica. Los datos de campo fueron procesados con el software RocData v5 para obtener las propiedades geomecánicas necesarias como datos de entrada para los softwares de análisis, los resultados se muestran en la Tabla 11. El análisis con el software RocData fueron complementados con otras propiedades físicas necesarias para el análisis con softwares y el resumen final de dichas propiedades geomecánicas se pueden apreciar en las tablas 12,13 y 14. A través del cartografiado geológico se determinó el tipo de litología (ki-pa, Ks-yu, Qh-al, Qh-de, Qh-fl), Se calculó el factor de seguridad para cada uno se muestran en la tabla 16, y teniendo en cuenta el rango de valores de los taludes tienen un comportamiento inestable, Se elaboró un mapa geomecánico teniendo en cuenta al factor de seguridad de cada uno de los perfiles.

Palabras Claves: Geomecánica, Talud, Inestabilidad.

ABSTRAC

The present research work was carried out on a road - Celendín, in the district of the laguna, province and department of Cajamarca, in this road there are sections that are instability. It is necessary to define the geomechanical characteristics along the road, to determine the current safety factors, mainly in the critical sections. The geomechanical part was evaluated through where rock mass data and discontinuity properties could be obtained to calculate its RMR (Rock Mass Rating) of each geomechanical station. The objective is to carry out the geomechanical evaluation of the slopes of road in the km section. 32 + 000 - km. 46 + 000, for which three geomechanical stations were realized, one for each geotechnical unit. The field data were processed with the RocData v5 software to obtain the required geomechanical properties as input data for the analysis software, the results are shown in Table 11. The analysis with the software RocData were complemented with other physical properties necessary for the analysis with softwares and the final summary of said geomechanical properties can be seen in Tables 12, 13 and 14. The geological mapping was determined the type of lithology (ki-pa, Ks-yu, Qh-al, Qh-de, Qh-fl). The safety factor was calculated for each shown in Table 17, and taking into account The range of values of the slopes have an unstable behavior, a geomechanical map was developed taking into account the of the safety factor of each of the Profiles.

Keys Words: Geomechanics, Slope, Instability.

CONTENIDO	Pág.
RESUMEN	iv
ABSTRAC	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	xi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	3
MARCO TEÓRICO	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.2 BASES TEÓRICAS	4
2.2.1 TALUDES	4
2.2.2 FACTORES INFLUYENTES EN LA ESTABILIDAD	4
2.2.3 TIPOS DE ROTURA	6
2.2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS	7
2.2.5 CRITERIOS DE ROTURA	9
2.2.6 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	20
2.2.7 CALIZA	22
2.2.8 SISMICIDAD	23
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	24
CAPÍTULO III	25
MATERIALES Y MÉTODOS	25

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	25
3.2 ACCESIBILIDAD	26
3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	26
3.3.1 TIPO Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
3.3.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	26
3.3.3 MUESTRA	26
3.3.4 UNIDAD DE ANÁLISIS	26
3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN	26
3.4.1 TÉCNICAS.....	26
3.4.2 INSTRUMENTOS Y MATERIALES	27
3.5 PROCEDIMIENTO Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	27
3.5.1 ETAPA DE GABINETE.....	27
3.5.2 ETAPA DE CAMPO.....	27
3.5.3 ETAPA FINAL	28
3.6 GEOLOGÍA	28
3.6.1 FORMACIONES DEL CRETÁCEO INFERIOR	28
3.6.2 DEPÓSITOS CUATERNARIOS.....	29
3.6.3 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS	32
CAPÍTULO IV.....	35
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
4.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	35
4.1.1 ANÁLISIS CON EL SOFTWARE SLIDE v7	35
4.1.2 FACTOR DE SEGURIDAD SEGÚN LAS CONDICIONES Y MÉTODOS UTILIZADOS EN EL SLIDE v7	37
4.1.3 PROMEDIO DEL FS PARA CADA UNO DE LOS MÉTODOS	45

CAPÍTULO V	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
5.1 CONCLUSIONES.....	46
5.2 RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXOS	49
A. TABLA –DIAGRAMA DE TRANSICIÓN DE UN MACIZO ROCOSO INTACTO A UNO FUERTEMENTE FRACTURADO.	49
B. TABLAS DE REGISTRO EN CAMPO	49
C. PLANOS	49
D. PERFILES	49
E. ANÁLISIS CON EL SOFTWARE ROCDATA V5	49
F. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE SLIDE V7.	49

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Parámetros del Rock Mass Rating (Bieniawski, 1979).....	8
Tabla 2: Relación entre el RMR y propiedades geomecánicas.	9
Tabla 3: Estimación de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta σ_{ci}	12
Tabla 4: Estimación del m_i	13
Tabla 5: GSI para macizos rocosos homogéneos. Adaptada de Hoek (2006).....	15
Tabla 6: Cuantificación del GSI, Adaptada de Hoek (2006).....	16
Tabla 7 Estimación del factor de disturbación D	17
Tabla 8: Variables de sismicidad para obtener las componentes sísmicas horizontales y verticales. (LoadCap, 2014).....	23
Tabla 9: Coordenadas UTM-WGS84 de los límites de la carretera de estudio.....	25
Tabla 10: Accesibilidad a la carretera de estudio.	26

Tabla 11. Características y ubicación de las estaciones geomecánicas para cada unidad geotécnica.	32
Tabla 12. Propiedades geomecánicas de la Formación Pariatambo en el Km 32+500.	32
Tabla 13. Propiedades geomecánicas de la Formación Yumagual en el Km 39+700.	33
Tabla 14. Propiedades geomecánicas de la Formación Yumagual 2 en el Km 41+000.	33
Tabla 15. Condiciones desencadenantes en los utilizados en los análisis.	34
Tabla 16. Resultados del análisis de seguridad global.	36
Tabla 17. factor de seguridad-Ki-pa	37
Tabla 18. Perfil A-A'	37
Tabla 19. Perfil D1-D1'	38
Tabla 20. Perfil D2-D2'	38
Tabla 21. Perfil E-E'	38
Tabla 22. Perfil F-F'	39
Tabla 23. factor de seguridad-Ks-yu	40
Tabla 24. Perfil B-B'	40
Tabla 25. Perfil C-C'	40
Tabla 26. Perfil G-G'	41
Tabla 27. factor de seguridad-Ks-yu ²	41
Tabla 28. Perfil H-H'	41
Tabla 29. Perfil I-I'	42
Tabla 30. Perfil J-J'	43
Tabla 31. Perfil K-K'	44
Tabla 32. Perfil L-L'	44
Tabla 33: Resumen de los factores de seguridad en diferentes condiciones.	45

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Falla de un talud. (Das B., 2009)	4
Figura 2: Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos. (González de Vallejo L. et. al., 2004)	5
Figura 3: Tipo de superficies de rotura en suelos. (González de Vallejo L. et. al., 2004)	7
Figura 4: Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. (Melentijevic, S. 2005)	10
Figura 5: Gráfico de las envolventes de rotura para el criterio de Hoek y Brown y del criterio de Mohr Coulomb. Apreciándose las gráficas de la resistencia uniaxial y global. (Hoek, 2005).....	19
Figura 6: Gráfico en el que se recogen los diferentes métodos de cálculo. (Herrera, 2003)21	21
Figura 7: Carbonatos con textura deposicional reconocible. (Dunham, 1962).	22
Figura 8: Zonas sísmicas en el Perú y Cajamarca. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016)	23
Figura 9: Estratos de caliza intercalada con estratos de lutitas del Ki-Pa en el Km 36+300.	28
Figura 10: Calizas wackestone de la Formación Yumagual, en estratos de 1.5m aproximadamente; en zona de alta fracturación en el Km 41+100.	29
Figura 11: Depósitos aluviales ubicados en las partes bajas de los cerros Agujero y punta, son materiales transportados y depositados por el agua en épocas de lluvia, conformado por gravas gruesas con ligero redondeamiento y sedimentos no consolidados con contenidos de materia orgánica de composición calcárea en el Km 44+000.	30
Figura 12: Vista de depósitos deluviales en las laderas de los cerros Usnio y torre en el Km 38+200.....	30
Figura 13: Depósitos Fluviales del Río de la Encañada, que han sido transportados grandes distancias por lo cual tienden a tener una redondez y esfericidad creciente además se observa clastos mal clasificados de tamaños diversos.	31

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

a	: Constante que depende de las propiedades del macizo rocoso
c	: Cohesión
D	: Factor de disturbación del macizo rocoso
Dn	: Discontinuidad n
E	: Módulo de Young o Módulo de Elasticidad
Ei	: Módulo de Young de la roca intacta
Erm	: Modulo de deformación del macizo rocoso
FS	: Factor de Seguridad
GSI	: Índice de Resistencia Geológica
Kh	: Amplificación Estratigráfica (Sismicidad)
Km	: Kilometro
Kv	: Parametros de Zona (Sismicidad)
mb	: Valor reducido de la constante del material mi
mi	: Parámetro de la roca intacta obtenido de ensayos triaxiales
MN	: Meganewton
MPa	: Megapascales
N	: Newton
s	: Constante que depende de las propiedades del macizo rocoso
sigc	: Resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso
sigcm	: Resistencia global del macizo rocoso
sigt	: Fuerza de tensión del macizo rocoso

σ_1' : Tensión efectiva principal mayor en el momento de la rotura

σ_3' : Tensión efectiva principal menor en el momento de la rotura

σ_{ci} : Resistencia a la compresión uniaxial de los bloques de roca

ϕ : Ángulo de fricción

τ : Tensión tangencial

UTM : Universal Transversal de Mercator

WGS84: World Geodetic System 1984

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las carreteras son vías de transporte que hacen posible las diferentes actividades para el ser humano, estas carreteras se ven afectadas por la presencia de inestabilidad de taludes, En el Perú se ha visto estos casos de inestabilidad de taludes debido a diversos agentes geológicos externos y a las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y roca, causando grandes daños de interrupción de carreteras, dificultando el transporte, poniendo en riesgo la vida de los transportistas.

La carretera Encañada - Celendín es una vía de transporte que en su recorrido une distintas poblaciones como Michiquillay, Quinuamayo, Micuypampa, Sucre, José Gálvez y Celendín; en esta carretera hay tramos que presentan inestabilidad perjudicando el transporte y a la población, por los deslizamientos y caídas de rocas. Siendo necesario definir las características geomecánicas a lo largo de la carretera, para determinar los factores de seguridad actuales, principalmente en los tramos críticos.

La operatividad de la carretera presenta serias dificultades por estar ubicada en una zona de condiciones naturales complejas, intensificándose los daños durante los periodos de lluvias intensas. Por ello se formula la siguiente interrogante: ¿Cuáles son las características geomecánicas de los taludes de la carretera Encañada- Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000? Se plantea como hipótesis que las características y propiedades físicas y mecánicas de los suelos y rocas de los taludes de la carretera Encañada – Celendín en el tramo km. 32+000-km. 46+000, influyen en la inestabilidad provocando deslizamientos y caídas de rocas.

La investigación tiene como propósito analizar las características geomecánicas de los taludes a lo largo de la carretera Encañada-Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000,

localizando las zonas de susceptibilidad y el peligro que este representa para el desarrollo de las poblaciones que comunica esta carretera. Contribuirá a la identificación de los taludes inestables, remediar daños a causa de deslizamientos y caídas de rocas, dada la inestabilidad de los taludes a lo largo de la carretera. También proveerá información para investigaciones futuras de la zona estudiada.

El objetivo general de la investigación es realizar la evaluación geomecánica de los taludes de la carretera Encañada - Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000; y como objetivos específicos: realizar el cartografiado geológico de la carretera Encañada - Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000, describir las características físicas y mecánicas del macizo rocoso y suelos, calcular el factor de seguridad de los taludes en tramos inestables de la carretera Encañada - Celendín mediante el software slide v7 y elaborar un mapa geomecánico determinando las zonas inestables de la carretera.

El contenido de los capítulos se describe a continuación:

Capítulo II: En este capítulo se desarrolla el marco teórico de la investigación, mencionando antecedentes y bases teóricas de diferentes autores, relacionados con el tema de investigación.

Capítulo III: Se especifica la ubicación del área de estudio, la accesibilidad, el clima, la vegetación. Se describe la geología, geomorfología e hidrología, los datos recolectados en campo son ordenados en estaciones para su análisis mediante los softwares RocData, Dips, Slide, Swedge. También se explica la metodología y procedimientos utilizados para la investigación.

Capítulo IV: En este capítulo se presentan y explican los resultados obtenidos del análisis de los datos de campo, de acuerdo a los objetivos establecidos y se realiza la contratación de la hipótesis.

Capítulo V: Se presentan las conclusiones y las recomendaciones correspondientes de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

Sáenz (2015). Realiza la “Evaluación geotécnica de los taludes en el tramo de carretera el gavián – chigden” determinando el comportamiento geotécnico y factores de seguridad de los taludes, influenciada por la presencia de rocas altamente fracturadas y por el alto ángulo de talud que presentan, definiendo la inestabilidad en zonas críticas de los taludes.

Mercado (2014). “Análisis de inestabilidad de taludes en zonas críticas en la carretera Cajamarca – Celendín en el tramo Km. 46+000 – Km 94+400”, donde analiza la inestabilidad de taludes en zonas críticas, teniendo en cuenta características litológicas, geomorfológicas, estructurales. Analiza también los factores de seguridad en zonas críticas.

Montoya (2014). “Evaluación geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca – El Gavilán”, donde analiza la inestabilidad de los taludes de dicha carretera, teniendo en cuenta el contexto geológico local, regional y la estrecha relación que existe con los agentes geodinámicos.

Zavala & Rosado (2011) Realizaron un estudio de riegos en la región de Cajamarca, donde se analizaron las características climáticas, geológicas y sísmicas que conllevan a la ocurrencia de procesos geodinámicos y determinaron 117 zonas de peligrosidad y susceptibilidad en la región Cajamarca.

Reyes (1980) Realizo un estudio que corresponde a los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos, Cajabamba. Analiza regionalmente el área de estudio, realizando un cartografiado a escala 1: 100,000 en base a un estudio litológico, estratigráfico, estructural, geomorfológico en forma general, y no teniendo relación con la estabilidad de taludes.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 TALUDES

Una superficie de terreno expuesta situada a un ángulo con la horizontal se llama talud o pendiente no restringida, y puede ser natural o construido. Si la superficie del terreno no es horizontal, una componente de la gravedad ocasionará que el suelo se mueva hacia abajo, como muestra la figura. Si la componente de la gravedad es suficientemente grande ocurrirá la falla del talud; es decir, la masa de suelo en la zona abcde se deslizará hacia abajo. La fuerza actuante vence a la fuerza resistente de la resistencia al corte del suelo a lo largo de la superficie de ruptura.

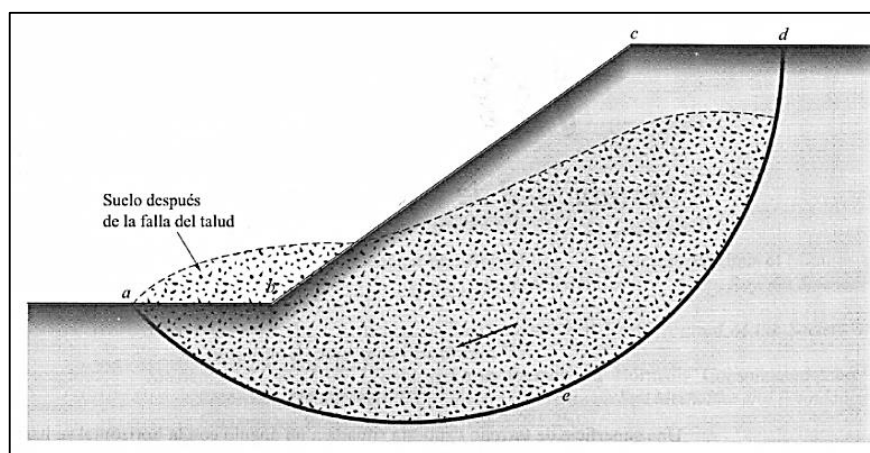


Figura 1: Falla de un talud. (Das B., 2009)

En muchos casos los ingenieros tienen que efectuar cálculos para verificar la seguridad de taludes naturales, taludes de excavaciones y de terraplenes compactados. Este proceso, llamado análisis de la estabilidad de taludes, implica determinar y comparar el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de la superficie más probable de falla con la resistencia cortante del suelo. El análisis de la estabilidad de un talud no es tarea fácil. La evaluación de variables tales como la estratificación del suelo y sus parámetros de resistencia cortante resulta una tarea formidable. La infiltración a través del talud y la selección de una superficie de deslizamiento potencial se agregan a la complejidad del problema. (Das B., 2009)

2.2.2 FACTORES INFLUYENTES EN LA ESTABILIDAD

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud), factores hidrogeológicos (Presencia de agua) y factores geotécnicos o relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformabilidad).

La condición de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y que sea cinemáticamente posible el movimiento de un cierto volumen de masa de suelo o roca. La posibilidad de rotura y los mecanismos y modelos de inestabilidad de los taludes están controlados principalmente por factores geológicos y geométricos.

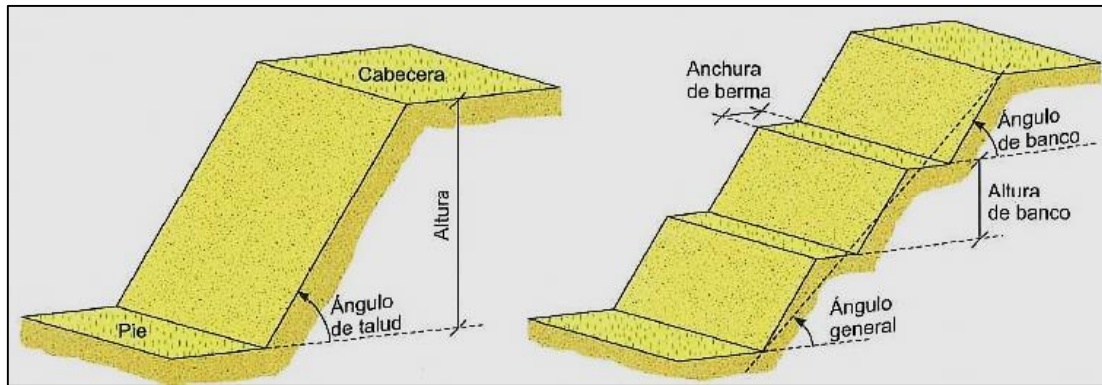


Figura 2: Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos. (González de Vallejo L. et. al., 2004)

Los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos se consideran factores condicionantes, y son intrínsecos a los materiales naturales. En los suelos la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud. En el caso de macizos rocosos competentes el principal factor condicionante es la estructura geológica: la disposición y frecuencia de las superficies de discontinuidad y el grado de fracturación; en materiales blandos, la litología y el grado de fracturación juegan también un papel preponderante.

Junto a los factores condicionantes de la estabilidad de los taludes (también denominados pasivos), los factores desencadenantes o activos provocan la rotura una vez que se cumplen una serie de condiciones. Estos últimos son factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, modificando sus características y propiedades y las condiciones de equilibrio del talud. El conocimiento de todos ellos permitirá un correcto análisis del talud, la evaluación del estado de estabilidad del mismo y, en su caso, el diseño de las medidas que deberán ser adoptadas para evitar o estabilizar los movimientos.

Otros factores

Las sobrecargas estáticas y las cargas dinámicas que se ejercen sobre los taludes modifican la distribución de las fuerzas y pueden generar condiciones de inestabilidad. Entre las

primeras están el peso de estructuras o edificios, u otro tipo de cargas como rellenos, escombreras, paso de vehículos pesados, etc. que, cuando se ejercen sobre la cabecera de los taludes, aportan una carga adicional que puede contribuir al aumento de las fuerzas desestabilizadoras.

Las cargas dinámicas se deben, principalmente, a los movimientos sísmicos, naturales o inducidos, y a las vibraciones producidas por voladuras cercanas al talud. El principal efecto en los macizos rocosos fracturados es la apertura de las discontinuidades preexistentes, con la consiguiente reducción de su resistencia al corte, y la individualización y caída de bloques rocosos.

Las precipitaciones y el régimen climático influyen en la estabilidad de los taludes al modificar el contenido de agua en el terreno. La alternancia de periodos de sequía y lluvia produce cambios en la estructura de los suelos que dan lugar a pérdidas de resistencia.

En determinados tipos de suelo o macizos rocosos blandos, los procesos de meteorización juegan un papel importante en la reducción de sus propiedades resistentes, dando lugar a una alteración y degradación intensas al ser expuestos los materiales a las condiciones ambientales como consecuencia de una excavación. Esta pérdida de resistencia puede dar lugar a la caída del material superficial y, si afecta a zonas críticas del talud, como su pie, puede generar roturas generales, sobre todo en condiciones de presencia de agua. (González de Vallejo L. et. al., 2004).

2.2.3 TIPOS DE ROTURA

2.2.3.1 Taludes en suelos y rocas de baja calidad

Los taludes en suelos rompen a favor de superficies curvas, en forma diversa condicionada por la morfología y estratigrafía del talud.

- Puede ser aproximadamente circular (la más frecuente), con su extremo inferior en el pie del talud (deslizamiento de pie), cuando éste está formado por terreno homogéneo o por varios estratos de propiedades geotécnicas homogéneas. Figura 3.b.
- Puede ser casi circular, pero pasando por el pie del talud (deslizamiento profundo). Figura 3.c.

Si se dan determinadas condiciones en el talud, como la existencia de estratos o capas de diferente competencia, puede tener lugar una rotura a favor de una superficie plana o de una superficie poligonal formada por varios tramos planos. Figura 3.d.

Las roturas de taludes en suelos a favor de un único plano paralelo al talud son prácticamente inexistentes, aunque este modelo puede ser válido en el caso de laderas naturales con recubrimiento de suelos sobre rocas (Figura 3.a) o en el caso de taludes rocosos, donde la presencia de discontinuidades paralelas al talud puede definir superficies de rotura planas, aunque en general éstas no alcanzan la cabecera del talud. El modelo de talud infinito (su longitud puede considerarse infinita con respecto al espesor de la masa que rompe) puede adoptarse en muchas laderas naturales donde la superficie de rotura está definida por el contacto, prácticamente paralela al talud, entre el terreno superficial (coluvial o solo residual) y la roca subyacente. (González de Vallejo L. et. al., 2004)

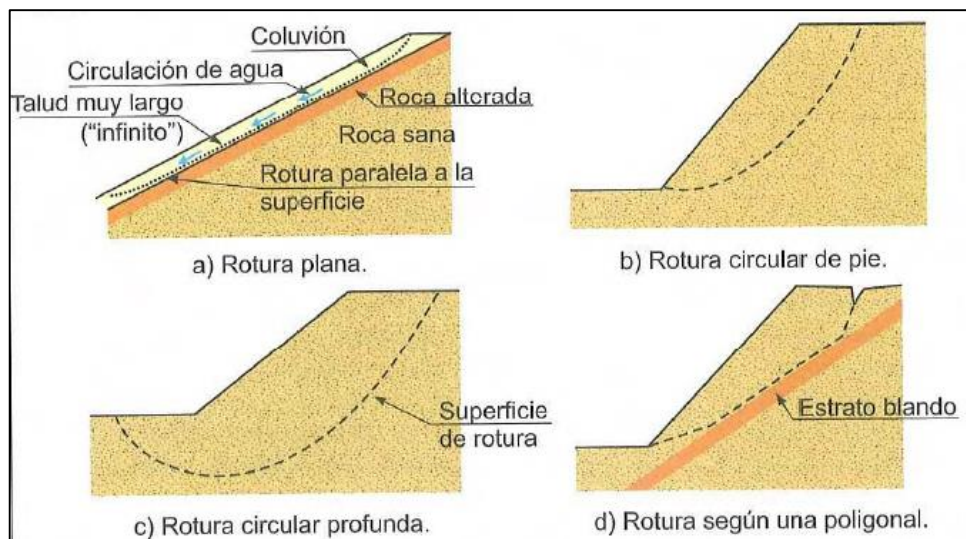


Figura 3: Tipo de superficies de rotura en suelos. (González de Vallejo L. et. al., 2004)

2.2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS

2.2.4.1 Clasificación de los macizos rocosos

- Clasificación de Bieniawski (RMR)

Permite hacer una clasificación de las rocas 'in situ' y estimar el tiempo de mantenimiento y longitud de un tramo. Se utiliza usualmente en la construcción de túneles, de taludes y de

cimentaciones. El RMR se obtiene estimando los siguientes parámetros: la resistencia a compresión simple de la roca, el RQD (Rock Quality Designation), la separación entre las diaclasas, condición de las discontinuidades, condición de infiltración de agua. Al resultado de cada uno de los parámetros se le asigna, según las tablas, un valor y se suman todos ellos para obtener el índice de calidad RMR sin correcciones. A este valor se le debe restar un factor de ajuste en función de la orientación de las discontinuidades. (Gavilanes H. & Andrade B., 2004)

Tabla 1: Parámetros del Rock Mass Rating (Bieniawski, 1979)

Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MP	< 1 MPa
	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		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm		
	valor		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
valor	6	5	3	1	0				
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
	valor	15	10	7	4	0			

Tabla 2: Relación entre el RMR y propiedades geomecánicas.

Clase	Calidad	RMR	Cohesión (kPa)	Angulo de fricción (°)
I	muy buena	81 – 100	> 400	> 45
II	buena	61 – 80	300 – 400	35 – 45
III	regular	41 – 60	200 – 300	25 – 35
IV	mala	21 – 40	100 – 200	15 – 25
V	muy mala	0 - 20	< 100	< 15

- Índice de calidad de la roca (RQD)

Cuando no se dispone de núcleos de perforación, el RQD puede ser estimado a partir de una línea o un área de mapeo, como se describe a continuación: Para 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 H. & Andrade B., 2004).

El RQD obtenido de esta manera, se puede calcular con la siguiente ecuación:

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

Dónde:

λ =Numero de discontinuidades /Longitud (m)

RQD	<25	25-50	50-75	75-90	90-100
CLASIFICACION	Muy pobre	Pobre	Regular	Bueno	Muy Bueno

2.2.5 CRITERIOS DE ROTURA

2.2.5.1 Criterio 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, al esfuerzo cortante, así como tensión normal. La mayoría de los materiales en ingeniería clásica se comportan siguiendo esta teoría al menos en una parte del corte. En general, la teoría se aplica a los materiales para los que la resistencia a la compresión es muy superior a la resistencia a la tracción, caso de los materiales cerámicos. La teoría explica que el corte de un material se produce para una combinación entre tensión normal y tensión tangencial,

y que cuanto mayor sea la tensión normal, mayor será la tensión tangencial necesaria para cortar el material. (Wikipedia, 2016)

El criterio de fallo de Mohr-Coulomb se representa por la envolvente lineal de los círculos de Mohr que se producen en la rotura. La relación de esa envolvente se expresa como:

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

donde:

- c es la cohesión, una constante que representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada.
- ϕ es el ángulo de fricción.
- τ es la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura.
- σ_n es la tensión normal que actúa en el plano de rotura.

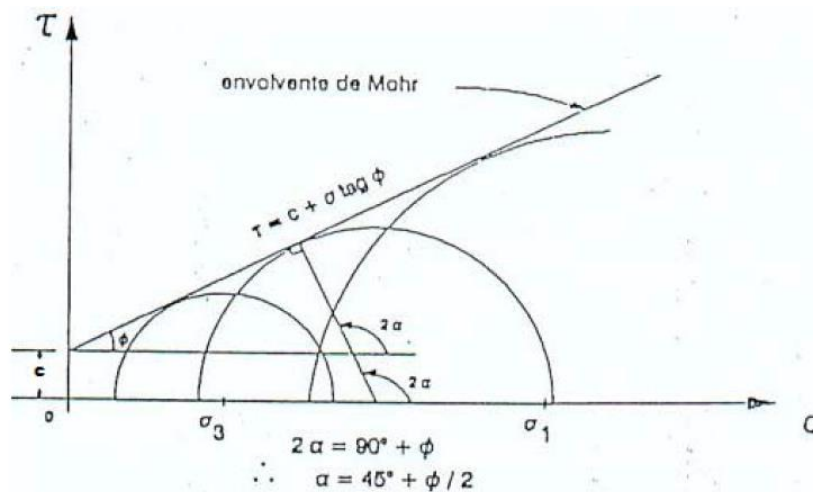


Figura 4: Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. (Melentijevic, S. 2005)

2.2.5.2 Criterios de rotura de Hoek-Brown

El criterio de falla generalizado de Hoek-Brown para macizos rocosos fracturados, está definido por:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \times \left(m_b \times \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

Y para asumir al comportamiento de fractura como isotrópico (Anexo A). Donde σ'_1 y σ'_3 son los esfuerzos efectivos principales mayor y menor, respectivamente, en la condición de falla, m_b es el valor de la constante m de Hoek-Brown para el macizo rocoso, s y a son constantes que dependen de las características del macizo rocoso y σ_{ci} es la resistencia a la compresión uniaxial de los trozos o bloques de roca intacta que conforman el macizo rocoso. Es posible obtener algunas relaciones matemáticas exactas entre el criterio de Hoek-Brown, expresado en términos de los esfuerzos principales mayor y menor, y la envolvente de Mohr definida en términos de los esfuerzos normales y de corte. Sin embargo, estas relaciones son difíciles de manejar y el procedimiento original usado por Hoek-Brown es más práctico. En este procedimiento, la ecuación (1) se emplea para generar una serie de valores triaxiales, simulando ensayos in situ a escala real, y se usa un proceso estadístico de ajuste de curvas para obtener una envolvente de Mohr equivalente, la cual está definida por la ecuación:

$$\tau = A \times \sigma_{ci} \times \left(\frac{\sigma'_n - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}} \right)^B \quad (2)$$

Donde **A** y **B** son constantes que dependen del material, σ'_n es el esfuerzo normal efectivo, y σ_{tm} es la “resistencia a la tracción”, del macizo rocoso. Esta “resistencia a la tracción”, que representa la trabazón de los bloques de roca cuando éstos no pueden dilatarse libremente, está dada por:

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{ci}}{2} \times \left(m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \quad (3)$$

En orden a utilizar el criterio de Hoek-Brown para evaluar la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos fracturados, se deben evaluar tres “propiedades” del macizo rocoso. Estas son:

- La resistencia en compresión no confinada σ_{ci} de los trozos de roca intacta en el macizo rocoso.
- El valor de la constante m_i de Hoek-Brown para esta roca intacta.
- El valor del Índice de Resistencia Geológica **GSI** para el macizo rocoso.

Propiedades De La Roca Intacta

Para los bloques de roca intacta que conforman el macizo rocoso, la ecuación (1) se simplifica a:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \times \left(m_i \times \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (4)$$

La relación entre los esfuerzos principales efectivos en la condición de falla para un tipo de roca dado, está definida por dos constantes, la resistencia en compresión no confinada σ_{ci} y una constante m_i . Siempre que sea posible, los valores de estas constantes deberían determinarse mediante análisis estadísticos de los resultados obtenidos de una serie de ensayos triaxiales efectuados sobre testigos de sondajes cuidadosamente preparados, cuando las pruebas de laboratorio no son posibles, la tabla 3 y tabla 4, pueden utilizarse para obtener estimaciones de σ_{ci} y m_i .

Tabla 3: Estimación de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta σ_{ci}

CALIDAD*	TÉRMINO	ESTIMACIÓN DE CAMPO DE LA RESISTENCIA	RESIST. A LA COMP. UNIAXIAL (MPa)	ÍNDICE DE CARGA PUNT. (Mpa)	EJEMPLOS
R6	Extremadamente resistente	Solo se pueden romper esquirlas de la roca con el martillo de geólogo.	> 250	> 10	Basalto, diabasa, gneis, granito, cuarcita, chert.
R5	Muy resistente	Se necesitan muchos golpes con el martillo para romperla.	100 - 250	4 - 10	Anfibolita, arenisca, gneis, gabro, granodiorita, basalto.
R4	Resistente	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romperla.	50 - 100	2 - 4	Caliza, mármol, esquisto, arenisca.
R3	Moderadamente Resistente	No se puede rayar o labrar con una navaja, se pueden romper con un golpe firme con el martillo.	25 - 50	1 - 2	Lutita, carbón, concreto, esquisto, pizarra, limolita
R2	Débil	Puede labrarse con dificultad con una navaja, se pueden hacer marcas superficiales golpeando fuertemente con el martillo.	5.0 - 25	**	Creta, marga, yeso, esquisto, pizarra
R1	Muy Débil	Deleznable bajo golpes fuertes con la punta del martillo de geólogo puede labrarse con una navaja.	1.0 - 5.0	**	Roca alterada o muy alterada
R0	Extremadamente Débil	Rayado con la uña del dedo pulgar.	0.25 - 1	**	Milonita de falla

*Calidad según Brown (1981).

**Las pruebas de carga puntual en rocas con una resistencia a la compresión uniaxial debajo de 25MPa tienden a generar resultados ambiguos.

Tabla 4: Estimación del m_i

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 m_i dependiendo de la naturaleza del material cementante y el grado de cementación.

Índice de Resistencia Geológica (GSI)

La resistencia de un macizo rocoso fracturado depende de las propiedades de los trozos o bloques de roca intacta y, también, de la libertad de éstos para deslizar y girar bajo distintas condiciones de esfuerzo.

Esta libertad está controlada por el perfil geométrico de los trozos o bloques de roca intacta, así como también, por la condición de las superficies que separan dichos trozos o bloques. Los trozos de roca angulosos, con caras definidas por superficies lisas y abruptas, producen un macizo rocoso mucho más competente que uno que contenga bloques completamente rodeados por material intemperizado y/o alterado.

Además, proporciona un número que combinado con las propiedades de la roca intacta se puede estimar la reducción de la resistencia del macizo rocoso para diferentes condiciones geológicas. Dicha reducción se debe a la mayor facilidad de fracturamiento a través y alrededor de los granos (bloques de la roca intacta) a medida que más granos son adicionales, y eventualmente la resistencia alcanzara un valor constante (Hoek, 2007).

Para la determinación del GSI la tabla 5 es utilizada para calcular el GSI para macizos homogéneos.

(Hoek, Carter, & Diederichs, 2013) realizaron la cuantificación GSI (tabla 6) sobre la base de las condiciones de las Discontinuidades (Bieniawski, 1989) y el RQD (D. Deere, 1967). De esta forma el GSI puede ser calculado de la siguiente manera.

Ecuación 8:
$$\text{GSI} = 1.5J\text{Cond}_{89} + \text{RQD}/2$$

Tabla 5: GSI para macizos rocosos homogéneos. Adaptada de Hoek (2006)







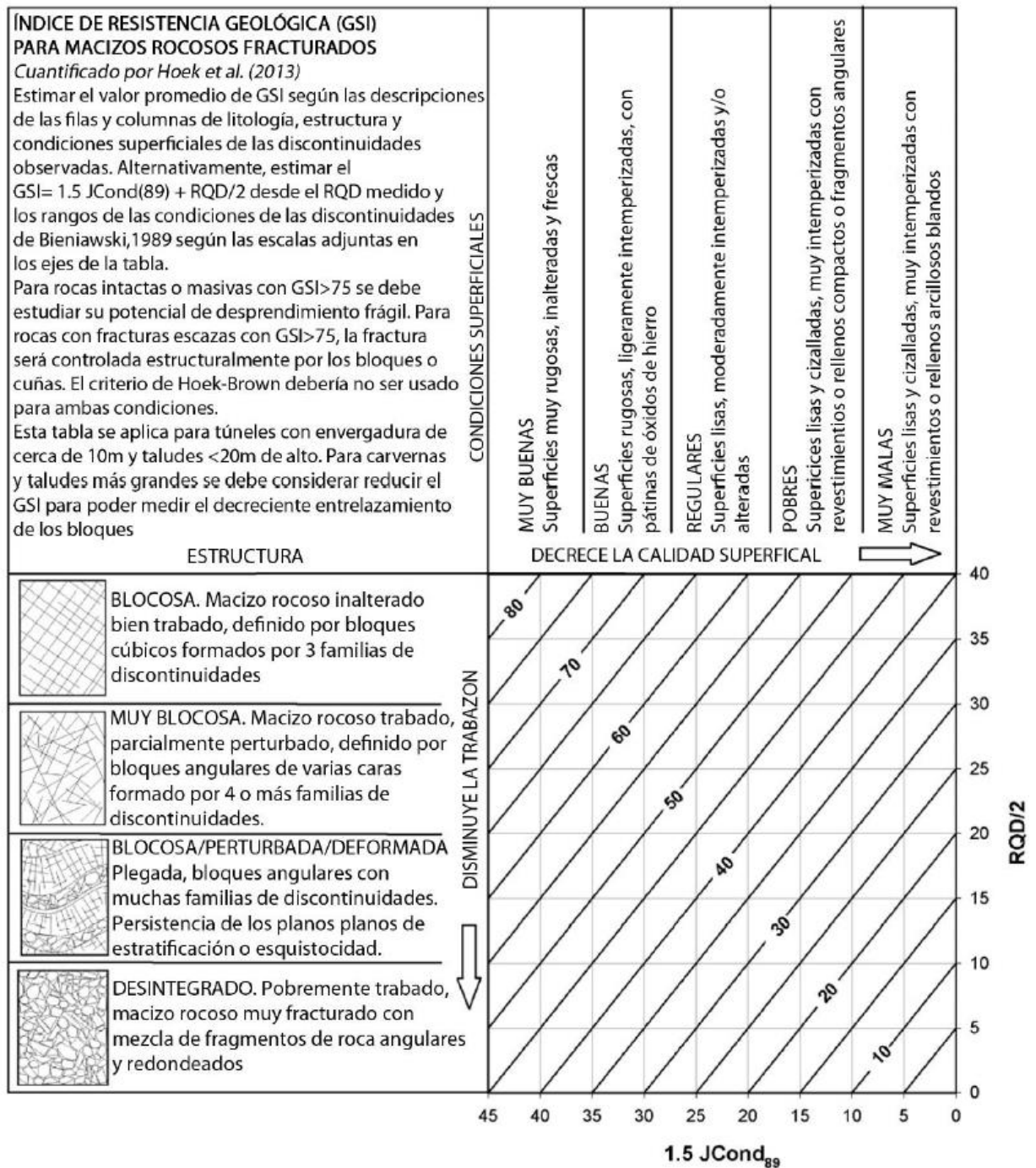
<p>ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA ROCAS FRACTURADAS (Hoek y Marinos, 2000) Estimar el valor promedio del GSI para la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades. No intentar ser muy preciso. Citar un rango de 33 a 37 es más realístico que un GSI de 35. Note que las tablas no se aplican a 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 roca 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>		CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES				
		MUY BUENA Superficies muy rugosas, inalteradas y frescas	BUENA Superficies rugosas, ligeramente intemperizadas, con pátinas de óxidos de hierro	REGULAR Superficies lisas, moderadamente intemperizadas y/o alteradas	MALA Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos compactos o fragmentos angulares	MUY MALA Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos arcillosos blandos
ESTRUCTURA		DECRESE LAS CONDICIONES SUPERFICIALES →				
 <p>INTACTA O MASIVA. Espécimen de roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas. Esp. 100cm</p>	150	90	80	N/A	N/A	
 <p>BLOCOSA. Macizo rocoso inalterado bien trabado, definido por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades. Esp. 30cm</p>	80	70	60			
 <p>MUY BLOCOSA. Macizo rocoso trabado, parcialmente perturbado, definido por bloques angulares de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades. Esp. 10cm</p>	40	50	40			
 <p>BLOCOSA/PERTURBADA/DEFORMADA Plegada, bloques angulares de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación o esquistocidad. Esp. 3cm</p>	5	30				
 <p>DESINTEGRADA. Pobremente trabada, macizo rocoso muy fracturado con mezcla de fragmentos de roca angulares y redondeados Esp. 1cm</p>	2			20		
 <p>LAMINADA/ CIZALLADA. Ausencia de blocosidad debido a espaciados cercanos de débil esquistocidad o planos de cizalla</p>		N/A	N/A		10	

Tabla 6: Cuantificación del GSI, Adaptada de Hoek (2006)



El factor de Disturbación D

Es un factor que depende del grado de perturbación debido a voladura y relajación tensional (Hoek et al., 2002) (Anexo A.7), variando desde 0 para macizos rocosos sin disturbación a 1 para macizos muy disturbados. Las nuevas variables se calculan así:

Ecuación 9:
$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)$$

Ecuación 10:
$$S = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$$

Ecuación 11:
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

(Van & Vásárhelyi, 2013) mostraron que el criterio de Hoek y Brown es sensitivo a la falta de certeza del GSI y del factor de disturbación D, pudiéndose generar valores muchas veces más altos de lo normal en caso no fueran tomados correctamente.

Tabla 7 Estimación del factor de disturbación D

APARIENCIA DEL MACIZO ROCOSO	DESCRIPCION DEL MACIZO ROCOSO	VALOR SUGERIDO DE D
	Excelente calidad por voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, resultando en la perturbación mínima del macizo alrededor del túnel	D=0
	Excavación mecánica o manual en macizo de mala calidad (sin voladura) resultando en la mínima perturbación en el macizo rocoso circundante Cuando se presentan problemas de fluencia con significantes movimientos en el piso, la perturbación puede ser severa a menos que una solera temporal o contrabóveda se instalada, como muestra la fotografía.	D=0 D=5 sin solera
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2-3m en el macizo circundante.	D=0,8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños en el macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía	D=0,7 ; buena voladura. D=1 pobre voladura
	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 retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cavo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor	D=1; voladura de producción D=0,7; excavación mecánica.

La Resistencia a la compresión uniaxial y tensional del macizo rocoso

La resistencia a la compresión uniaxial y tensional del macizo rocoso se obtiene mediante la suposición de $\sigma_3=0$ en la Ecuación 4, dando como resultado:

Ecuación 12:
$$\sigma_c = \sigma_{ci} * S^a$$

Ecuación 13:
$$\sigma_t = -\frac{S\sigma_{ci}}{mb}$$

La Ecuación 13 se obtiene suponiendo $\sigma_1=\sigma_3=\sigma_t$ en la Ecuación 4. Esto representa una condición de tensión biaxial (Hoek, 1983).

Los parámetros de Mohr-Coulomb

El proceso de ajuste implica equilibrar las áreas por encima y por debajo de la gráfica de Mohr-Coulomb, resultando:

Ecuación 14
$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

Ecuación 15
$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}}$$

La resistencia cizallante de Mohr-Coulomb τ , para una tensión normal σ dada, se encuentra por sustitución de valores de c' y ϕ' en la ecuación:

Ecuación 16:
$$\tau = c' + \sigma \tan \phi'$$

La gráfica equivalente en términos del esfuerzo principal mayor y menor, se define por:

Ecuación 17:
$$\sigma_1 = -\frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma_3$$

El valor de σ_3^{max} para su uso en la Ecuación 14 y Ecuación 15, para túneles (Ecuación 18), taludes (Ecuación 19) y para casos generales (Ecuación 20) es:

Ecuación 18:
$$\frac{\sigma_3^{max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94}$$

Ecuación 19:
$$\frac{\sigma_3^{max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$$

Ecuación 20:
$$\sigma_3^{max} = \frac{\sigma'_{ci}}{4}$$

La Ecuación 20 está basada en la observación empírica que el rango de tensiones asociado con la fractura frágil ocurre cuando σ_3 es menor a un cuarto de σ_{ci} . Dónde: γ es el peso específico de la roca intacta y H es la profundidad del túnel o altura del talud.

Resistencia Global del Macizo Rocoso

El fallamiento inicia cuando σ_c (resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso Ecuación 12.) es superada por la tensión inducida y se propaga un campo de tensión biaxial hasta estabilizarse cuando la fuerza local, Ecuación 4, es mayor que las tensiones σ_1 y σ_3 inducidas. Sin embargo, en ocasiones es útil considerar el comportamiento “global” de un macizo rocoso en lugar de detallar este proceso de fallamiento (Hoek, 2005):

Ecuación 21:
$$\sigma'_{cm} = -\frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

Con c' y ϕ' determinados por los rangos de tensiones $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{ci}/4$ dando:

Ecuación 22:
$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} * \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

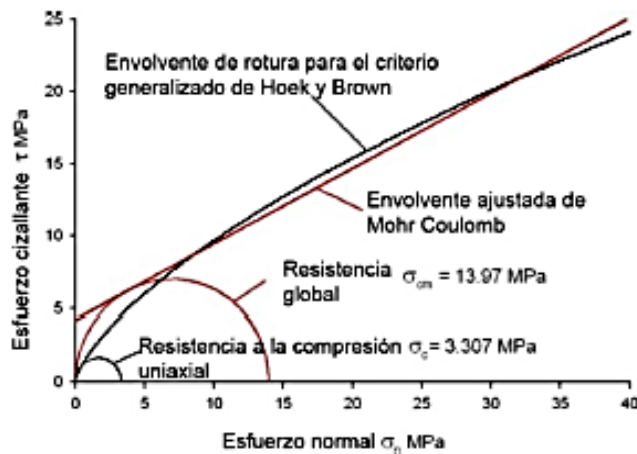


Figura 5: Gráfico de las envolventes de rotura para el criterio de Hoek y Brown y del criterio de Mohr Coulomb. Apreciándose las gráficas de la resistencia uniaxial y global. (Hoek, 2005).

El Modulo de Deformación

(Hoek & Diederichs, 2006), propusieron la siguiente ecuación para el cálculo del E_{rm} :

Ecuación 23:
$$E_{rm} \text{ (MPa)} = 100000 \left(\frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{((75 + 25D - GSI)/11)}} \right)$$

Con la relación de módulo MR (D. U. Deere, 1968) se puede estimar el E_i y luego el E_{rm} , que es una vía útil cuando no se cuentan con valores directos de E_i disponibles o cuando es difícil encontrar muestras sin perturbaciones:

Ecuación 24:
$$E_i = MR * \sigma_{ci}$$

Ecuación 25:
$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{((75 + 25D - GSI)/11)}} \right)$$

El criterio de Hoek-Brown ha sido validado ampliamente en casos reales como en simulaciones virtuales (Vallejos, Brzovic, Lopez, Bouzeran, & Mas Ivars, 2013), siendo una herramienta básica en la ingeniería geotécnica (Hammah & Curran, 2009).

2.2.6 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando estos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir un coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y de carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costes de ejecución, consecuencias o riesgos que podría causar su rotura, etc. Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud y que determina su comportamiento y condiciones de estabilidad. (Vallejo L. et. al. 2004)

2.2.6.1 Métodos de Equilibrio Límite

Se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte. (Herrera, F. 2003)

Se pueden clasificar a su vez en dos grupos: métodos exactos y métodos no exactos.

- **Métodos exactos:** La aplicación de las leyes de la estática proporcionan una solución exacta del problema con la única salvedad de las simplificaciones propias de todos los métodos de equilibrio límite (ausencia de deformaciones, factor de seguridad

constante en toda la superficie de rotura, etc.). Esto sólo es posible en taludes de geometría sencilla, como por ejemplo la rotura planar y la rotura por cuñas.

- **Métodos no exactos:** En la mayor parte de los casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema mediante la única aplicación de las leyes de la estática. El problema es hiperestático y ha de hacerse alguna simplificación o hipótesis previa que permita su resolución. Se pueden considerar así los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, hoy en desuso, y los métodos de las dovelas o rebanadas, que consideran a la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales.

Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en dos grupos:

- ✓ **Métodos aproximados:** no cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar por ejemplo los métodos de Fellenius, Janbu y Bishop simplificado.
- ✓ **Métodos precisos o completos:** cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los más conocidos son los de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop riguroso.

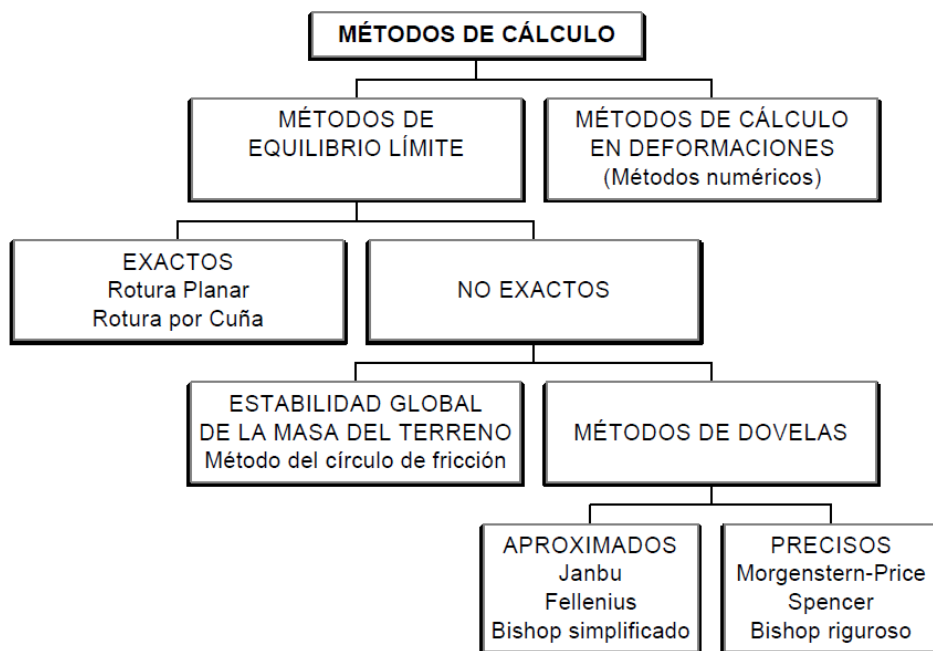


Figura 6: Gráfico en el que se recogen los diferentes métodos de cálculo. (Herrera, 2003)

2.2.7 CALIZA

Clasificación

Clasificación de Dunham (1962): Distingue dos tipos generales de carbonatos (rocas y sedimentos carbonaticos) (1) los que presentan textura deposicional reconocible, y (2) los que presentan textura cristalina, no siendo posible reconocer la textura deposicional.

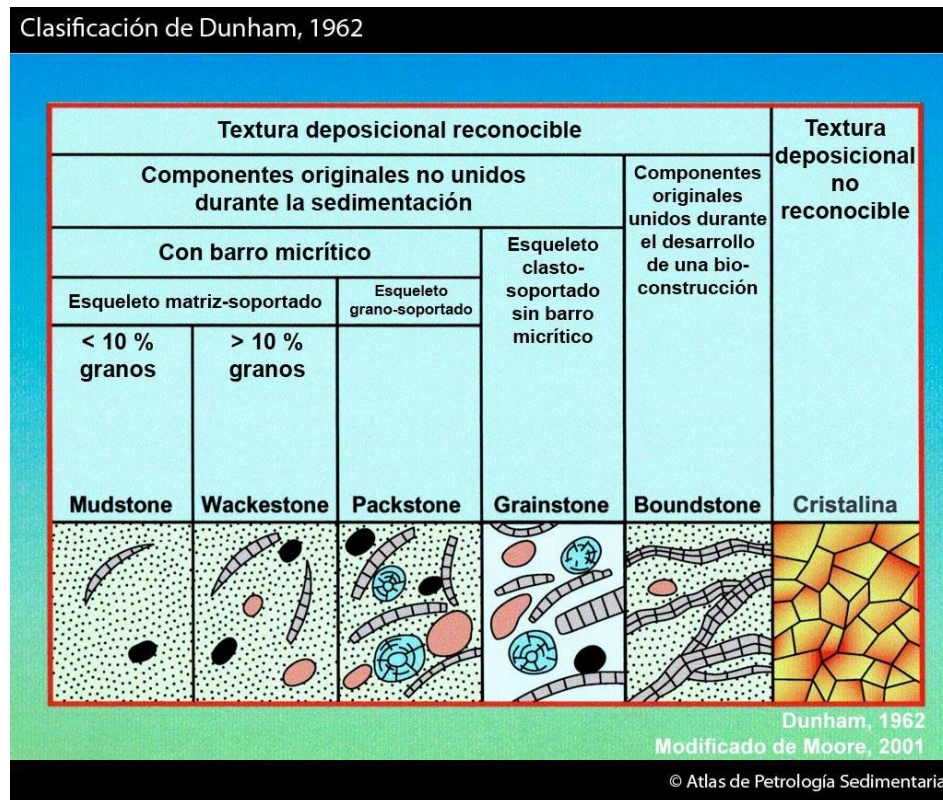


Figura 7: Carbonatos con textura deposicional reconocible. (Dunham, 1962).

Boundstone: Los componentes originales se encuentran ligados durante la sedimentación debido a la acción de organismos bioconstructores (corales, algas rodoñíceas, cianobacterias, etc.).

Grainstone: Textura grano-soportada y sin matriz micrítica. El espacio intergranular puede estar ocupado por cemento.

Packstone: Textura grano-soportada y con matriz micrítica. El espacio intergranular está ocupado por micrita.

Wackestone: Textura matriz-soportada con más del 10% de granos.

Mudstone: Textura matriz-soportada con menos del 10% de granos.

2.2.8 SISMICIDAD

La sismicidad es el estudio de los sismos que ocurren en algún lugar en específico. Un lugar puede tener alta o baja sismicidad, lo que tiene relación con la frecuencia con que ocurren sismos en ese lugar. (Zúñiga, R. 2011)

Zonas Sísmicas del Perú

El territorio nacional se considera dividido en cuatro zonas. La zonificación propuesta se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de éstos con la distancia epicentral, así como en la información neotectónica. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016)

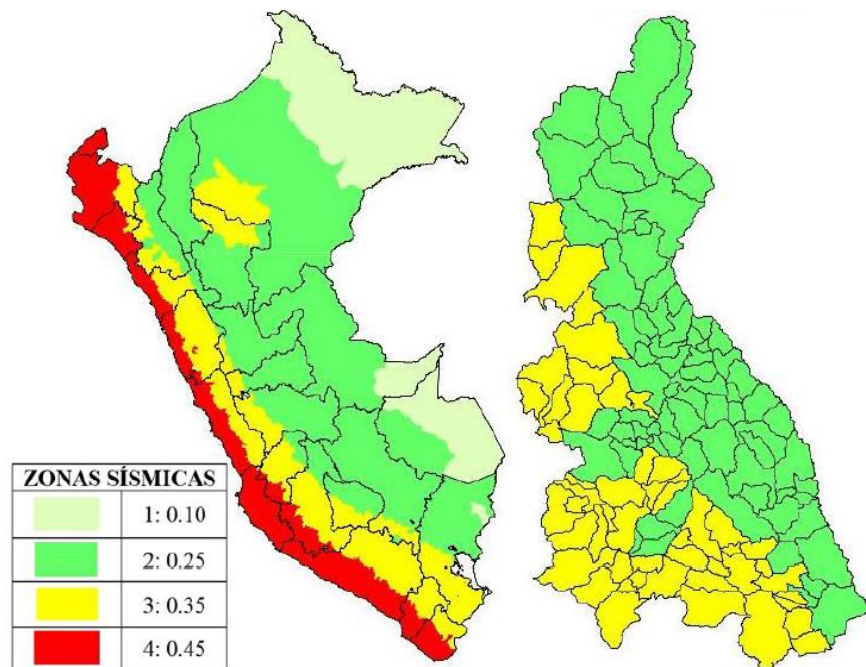


Figura 8: Zonas sísmicas en el Perú y Cajamarca. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016)

Análisis de Sismicidad

Para el análisis de sismicidad se requiere las componentes de sismicidad (K_h y K_v) que se obtienen de la siguiente tabla.

Tabla 8: Variables de sismicidad para obtener las componentes sísmicas horizontales y verticales. (LoadCap, 2014)

a: Zonas sísmicas del Perú	b: Coeficiente de amplificación topográfica	c: Categoría del perfil estratigráfico
1= 0.10 2= 0.25 3= 0.35 4= 0.45	1: Laderas y taludes con pendientes menores a 15°. 1.2: Laderas y taludes aislados con pendientes mayores a 15°. 1.4: Taludes y laderas con pendiente significativa menor grosor de cresta que de base, con pendientes mayores a 30°	0: S1 (Depósitos con niveles de más de 10m de arcillas/limos blandos con un índice de plasticidad alto (IP>40) y alto contenido de agua. S2 (Depósitos de suelos licuefactables, arcillas sensibles) 1: A (Roca u otra formación geológica similar a roca, incluyendo como máximo 5 m de material más débil en superficie) 1.25: B (Depósitos de arena muy densa, gravas, o arcilla muy dura, de decenas de metros de espesor caracterizado por un incremento de las propiedades mecánicas en profundidad). C (Depósitos de arena densa o media, grava o arcilla dura con un espesor de unas decenas hasta centenares de metros). E (Un perfil de suelo formado por una capa aluvial superficial. 1.35: D (Depósitos de suelo suelto de cohesión media a no cohesivo, con o sin capas de débil cohesión, o de ligera a gran cohesión predominantemente).

Las componentes sísmicas se definen como: Amplificación estratigráfica: $Kh=(a \times b \times c) / 2$

Parámetros de zona: $Kv=(a \times b \times c) / 4$

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **Talud:** Superficie inclinada del terreno se extiende de la base a la cumbre de un cerro. (Dávila B. J.)
- **Macizo rocoso:** Masa rocosa afectada por discontinuidades o superficies de debilidad. (González, 2002).
- **Rotura:** La rotura es un fenómeno que se produce cuando la roca no puede soportar las fuerzas aplicadas. (Vallejo L. et. al., 2004)
- **Discontinuidad:** Una discontinuidad es un plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de la matriz rocosa en un macizo rocoso. (Vallejo L. et. al., 2004)
- **Diaclasas:** Es una fractura que aparece en el cuerpo de una roca ocasionalmente producida por los esfuerzos tectónicos, presentado direcciones definidas a las cuales se les denomina sistemas de diaclasas. (Dávila J. 2011).
- **Deslizamientos:** Los deslizamientos consisten en movimientos de masas de roca, residuos o tierra, hacia abajo de un talud. (Cruden 1991).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La carretera Encañada – Celendín en el tramo Km 32+000 - Km 46+000 comprende el cuadrángulo de San Marcos (15g); con coordenadas UTM - DATUM - WGS84 – ZONA - 17S.

Tabla 9: Coordenadas UTM-WGS84 de los límites de la carretera de estudio.

Vértices	Longitud	Latitud
Punto inicial(Km 32+000)	793684	9216280
Punto final (Km 46+000)	799078	9218367

Políticamente se encuentra ubicado en:

- **Región** : Cajamarca
- **Provincia** : Cajamarca
- **Distrito** : Encañada

3.2 ACCESIBILIDAD

El acceso al punto de inicio de la carretera de estudio está desde el distrito de la Encañada iniciando en el Km 32+000 hasta el Km 46+000.

Tabla 10: Accesibilidad a la carretera de estudio.

Ruta terrestre	Distancia (km)	Tiempo (hr)	Vía	Estado
Cajamarca - Encañada	27	0.50	Asfaltado	Buena
Encañada - Quinuamayo	15	0.35	Asfaltado	Buena

3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1 TIPO Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación empleada es descriptiva y explicativa no experimental y transversal en el tiempo; basada en observaciones de los afloramientos de los taludes de la carretera. Tomando datos como: rumbo, buzamiento, fallas, pliegues, diaclasas y parámetros geomecánicos de los macizos rocosos, para realizar el análisis geotécnico; con los cuales se generarán interpretaciones y conclusiones finales.

3.3.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO

Carretera Encañada - Celendín, en el tramo Km 32+000 hasta el Km 46+000.

3.3.3 MUESTRA

Los taludes de la carretera Encañada - Celendín, en el tramo Km 32+000 hasta el Km 46+000.

3.3.4 UNIDAD DE ANÁLISIS

La unidad de análisis está representada por los taludes inestables de la Carretera Encañada - Celendín, en el tramo Km 32+000 hasta el Km 46+000.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN

3.4.1 TÉCNICAS

La técnica empleada para la recopilación de la información es:

Se trabajó en campo con los métodos de fichas geotécnicas para la recolección de datos, se utilizó para realizar una descripción cualitativa y cuantitativa de los taludes y mediciones de

discontinuidades, rumbos y buzamientos, de resistencia de las estaciones geomecánicas de los taludes y toma de fotografías. Los datos obtenidos en campo mediante la aplicación softwares geotécnicos como Slide V.7 y el Rocdata V.4 nos ayudaran a interpretar y analizar la estabilidad de taludes.

3.4.2 INSTRUMENTOS Y MATERIALES

- Brújula Brunton, Utilizado para la toma de datos de direcciones de discontinuidades y planos de estratificación.
- GPS Navegatorio Garmin Mal 60 Cx, utilizado para la obtención de coordenadas para la ubicación de puntos y estaciones geomecánicas.
- Wincha (30m) y Fluxómetro (5m), usado para medir los taludes y calcular el RQD.
- Cámara fotográfica digital Sony DSC-W310, utilizada para el registro fotográfico.
- Picota geológica y bolsa de muestreo. Herramienta usada para sacar muestras y calcular la resistencia del macizo rocoso.
- Computadoras de escritorio y laptop, máquina usada para el procesamiento de datos y redacción de informes.
- Libretas de campo, lapiceros y lápices, utilizados para anotaciones y cartografiado
- Software Arcgis V 10.5, Rocdata V. 4 Slide V.7, usados para crear los planos, calcular parámetros de resistencia del macizo rocoso y calcular el factor de seguridad correspondientemente.

3.5 PROCEDIMIENTO Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.5.1 ETAPA DE GABINETE

Estas etapas se conforman en dos fases: la primera, antes de comenzar el trabajo, que consiste en la planificación de tareas, con la recopilación de información y el análisis de imágenes satelitales para un mejor estudio de estructuras y geomorfomas. La segunda fase lo conforma el análisis e interpretaciones de los datos obtenidos en campo.

3.5.2 ETAPA DE CAMPO

Se realizará el cartografiado geológico y la caracterización geomecánica de la carretera Encañada - Michiquillay; permitiendo definir las condiciones geotécnicas.

3.5.3 ETAPA FINAL

Con la información obtenida en campo, se procesará e interpretará, luego se utilizará software como: ArcMap v10.4.1, Slide v7.017, RocData v5.006; con los cuales se logrará obtener los mapas temáticos finales. Se culminará con la redacción del informe.

3.6 GEOLOGÍA

Las unidades geológicas cartografiadas tomando como base los estándares del INGEMMET Se muestran en el anexo C, P-05.

3.6.1 FORMACIONES DEL CRETÁCEO INFERIOR

3.6.1.1 Formación Pariatambo (Ki-pa)

La Formación Pariatambo se observa en el Km 32+000 hasta el Km 33+000 y desde el Km 34+200 hasta el Km 36+800 aproximadamente, está formada por bancos uniformes de calizas mudstone, con intercalaciones de lutitas. Esta formación tiene una baja resistencia a la compresión uniaxial de la picota de geólogo. Es una formación fosilífera.



Figura 9: Estratos de caliza intercalada con estratos de lutitas del Ki-Pa en el Km 36+300.

3.6.1.2 Formación Yumagual (Ks-yu)

La Formación Yumagual se observa a lo largo de la carretera desde el Km 33+000 hasta el Km 34+000 y desde el Km 39+300 hasta el Km 45+500 aproximadamente, está formada por bancos gruesos de calizas wackestone de aproximadamente 1.5m de espesor, intercaladas con escasos niveles de lutitas. Estas calizas presentan una textura matriz-soportada con un bajo porcentaje de granos (>10%), y tienen alta resistencia a la compresión uniaxial de la picota de geólogo. En esta formación no se hallaron fósiles.



Figura 10: Calizas wackestone de la Formación Yumagual, en estratos de 1.5m aproximadamente; en zona de alta fracturación en el Km 41+100.

3.6.2 DEPÓSITOS CUATERNARIOS

3.6.2.1 Depósitos Aluviales (Qh-al)

Estos depósitos se observan en algunos sectores de la carretera, conformados por fragmentos subangulosos de rocas meteorizadas de las Formaciones calcáreas que conforman la carretera. Estos depósitos están influenciados por las filtraciones de aguas que se acumulan en las partes altas de los Cerros Punta y Agujero, y se presenta con mayor frecuencia en épocas de lluvia; esto genera principalmente la inestabilidad de estos depósitos y provocan deslizamientos.



Figura 11: Depósitos aluviales ubicados en las partes bajas de los cerros Agujero y punta, son materiales transportados y depositados por el agua en épocas de lluvia, conformado por gravas gruesas con ligero redondeamiento y sedimentos no consolidados con contenidos de materia orgánica de composición calcárea en el Km 44+000.

3.6.2.2 Depósitos Deluviales (Qh-de)

Los depósitos deluviales se presentan en las laderas de los cerros Usnio y Torre, conformado por materiales erosionados que no han sido transportados.



Figura 12: Vista de depósitos deluviales en las laderas de los cerros Usnio y torre en el Km 38+200.

3.6.2.3 Depósitos Fluviales (Qh-fl)

Estos depósitos se observan en las riberas de los ríos, formado por detritos redondeados que han sido transportados grandes distancias, el tamaño de los clastos y su composición es variada.



Figura 13: Depósitos Fluviales del Rio de la Encañada, que han sido transportados grandes distancias por lo cual tienden a tener una redondez y esfericidad creciente además se observa clastos mal clasificados de tamaños diversos.

3.6.3 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS

Se realizaron 3 estaciones geomecánicas, una para cada unidad geotécnica (Fm. Pariatambo (Ki-pa), Fm. Yumagual (Ks-yu), Fm. Yumagual 2 (Ks-yu2)). Los datos de campo fueron procesados con el software RocData v6 para obtener las propiedades geomecánicas necesarias como datos de entrada para los softwares de análisis, los resultados se muestran en el **Anexo E** y se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Características y ubicación de las estaciones geomecánicas para cada unidad geotécnica.

UNIDAD GEOLOGICA	MATERIAL	CRITERIO DE ROTURA	COORDENADAS DE LA ESTACION		
			ESTE	NORTE	COTA
Ki-pa	Macizo rocoso heterogéneo	Hoek-Brown	794498	9216286	3252
Ks-yu	Macizo rocoso homogéneo	Hoek-Brown	794485	9218660	3372
Ks-yu 2	Macizo rocoso homogéneo	Hoek-Brown	795098	9219468	3408

Los resultados del análisis con el software RocData fueron complementados con otras propiedades físicas necesarias para el análisis con softwares y el resumen final de dichas propiedades geomecánicas se pueden apreciar en las siguientes tablas.

Tabla 12. Propiedades geomecánicas de la Formación Pariatambo en el Km 32+500.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACION PARIATAMBO							
TIPO DE MACIZO							
Heterogéneo							
ROCA PREDOMINANTE:							
Caliza mudstone							
DENSIDAD SECA							
2450 Kg/m3							
POROSIDAD							
0.11							
DENSIDAD SATURADA							
2560 Kg/m3							
ALTURA PROMEDIO TALUDES		E: 794498, N: 9216286, Z: 3252					
50 m							
PARÁMETRO ENTRADA		VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO SALIDA		UNIDAD	
σ_{ci}	Clase	2	R	Criterio Hoek-Brown	mb	0.226708	-
	Valor	15	MPa		s	6.066E-05	-
IS	Heterog.	Heterog.	-		a	0.518255	-
	Roca no resistente	Lutita	-	Mohr-Coulomb Fit	c	0.127763	MPa
	Tipo de macizo	VII	-		ϕ	25.3308	grados
	Valor	33	-	Parametros del macizo rocoso	σ_t	-0.0040139	MPa
mi	9	-	σ_c		0.0978537	MPa	
Factor de disturbación	0.7	-	ocm		0.857388	MPa	
Relación de Módulo	900	-	Erm		550.91	MPa	
Ei	13500	MPa	Tipo de rotura (Mogi)		Frágil/Dúctil	-	

Tabla 13. Propiedades geomecánicas de la Formación Yumagual en el Km 39+700.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACION YUMAGUAL								
TIPO DE MACIZO:								
Homogéneo								
ROCA PREDOMINANTE:								
Caliza wackestone								
DENSIDAD SECA:								
2450 Kg/m ³								
POROSIDAD:								
0.11								
DENSIDAD SATURADA:								
2560 Kg/m ³								
ALTURA PROMEDIO TALUDES:		E: 794485, N: 9218660, Z: 3372						
50 m								
PARÁMETRO ENTRADA	VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO SALIDA	VALOR	UNIDAD			
σ_{ci}	Clase	3	R	Criterio Hoek-Brown	mb	0.843713	-	
	Valor	35	MPa		s	0.0014711	-	
GSI	Directo	Valor	55		-	a	0.504048	-
	Cuantificado	RQD	45	-	Mohr-Coulomb Fit	c	0.372866	MPa
		JCond89	20	-		ϕ	42.6342	grados
		Valor	52	-		σ_t	-0.0610264	MPa
mi		10	-	Parametros del macizo rocoso	σ_c	1.30745	MPa	
Factor de disturbación		0.7	-		σ_{cm}	4.31084	MPa	
Relación de Módulo		700	-		Erm	3617.31	MPa	
Ei		24500	MPa	Tipo de rotura (Mogi)	Frágil	-	-	

Tabla 14. Propiedades geomecánicas de la Formación Yumagual 2 en el Km 41+000.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACION YUMAGUAL 2								
TIPO DE MACIZO:								
Homogéneo								
ROCA PREDOMINANTE:								
Caliza wackestone								
DENSIDAD SECA:								
2450 Kg/m ³								
POROSIDAD:								
0.11								
DENSIDAD SATURADA:								
2560 Kg/m ³								
ALTURA PROMEDIO TALUDES:		E: 795098, N: 9219468, Z: 3408						
50 m								
PARÁMETRO ENTRADA	VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO SALIDA	VALOR	UNIDAD			
σ_{ci}	Clase	2	R	Criterio Hoek-Brown	mb	0.33154	-	
	Valor	15	MPa		s	0.0014711	-	
GSI	Directo	Valor	38		-	a	0.51302	-
	Cuantificado	RQD	30	-	Mohr-Coulomb Fit	c	0.154144	MPa
		JCond89	15	-		ϕ	28.5494	grados
		Valor	37	-		σ_t	-0.005665	MPa
mi		10	-	Parametros del macizo rocoso	σ_c	0.149315	MPa	
Factor de disturbación		0.7	-		σ_{cm}	1.07684	MPa	
Relación de Módulo		700	-		Erm	547.988	MPa	
Ei		10500	MPa	Tipo de rotura (Mogi)	Frágil	-	-	

VARIABLES DESENCADENANTES

Las suposiciones desencadenantes fueron:

1. Condiciones normales: el desencadenante es la misma gravedad.
2. Sismicidad máxima: condicionado por la máxima aceleración del terreno.
3. Saturación: nivel freático, media a mitad de la altura del material crítico, a la altura de la topografía superficial.

Una descripción más detallada de las condiciones de análisis se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15. Condiciones desencadenantes en los utilizados en los análisis.

ANALISIS AN.	CONDICION	GRAVEDAD M/S2	KH	KV	NIVEL FREATICO	APLICACIÓN
1	NORMAL	9.81	0	0	Ausente	En todos los análisis
2	SIS.MAX	9.81	0.263	0.13	Ausente	En todos los análisis
3	SAT.MEDIA	9.81	0	0	Altura media del material crítico	Cuando el FS en el An.1 es cercano a 1
4	SAT.TOTAL	9.81	0	0	Topografía superficial del talud	Cuando el FS en el An. 1 es alto y/o cuando es mayor a 1 en el An. 3
5	SAT.MEDIA Y SIS.MAX	9.81	0.263	0.13	Altura media del material crítico	Cuando el FS en el An. 1 es alto y/o cuando es mayor a 1 en el An. 3

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1.1 ANÁLISIS CON EL SOFTWARE SLIDE v7

Los criterios para el análisis de los perfiles con el software Slide v7 fueron:

1. Los métodos seleccionados por ser los más contemporáneos y realizar el equilibrio de mayor cantidad de variables (más exhaustivo) fueron: Spencer (SPEN), GLE / Morgenstern-Price (G/M-P), Sarma (SAR).
2. El método de búsqueda de la falla crítica fue el de “Auto Refine Search” ya que es mejor método para búsqueda de fallas críticas no evidentes, al centrar progresivamente el análisis donde se concentran los factores de seguridad más bajos.

Los resultados correlativos para el software se encuentran en el Anexo F resumiéndose en la Tabla 16, donde se muestra valores para cada uno de los métodos teniendo en cuenta las 5 condiciones como son: condiciones normales (se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m²), saturación media (se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m², adicionamos el nivel freático a lo largo del talud), saturación total (agregó una carga de 350.00 KN/m², adicionamos el nivel freático a lo largo de la superficie del talud), sismicidad máxima (se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m², adicionamos sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud), y una saturación media y sísmica máxima (se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m², adicionamos el nivel freático a lo largo del talud, una sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

Tabla 16.Resultados del análisis de seguridad global.

		SLIDE v7											
PERFIL	MATERIAL	CONDICIONES NORMALES				SAT. MEDIA				SAT. TOTAL			
		SPEN	G/M-P	SAR	PROM	SPEN	G/M-P	SAR	PROM	SPEN	G/M-P	SAR	PROM
A-A'	Ki-pa	1.612	1.601	1.599	1.604	1.038	1.059	1.019	1.039	0.535	0.512	0.609	0.552
B-B'	Ks-yu	4.454	4.444	4.427	4.442	3.444	3.427	3.480	3.450	3.036	3.022	3.069	3.042
C-C'	Ks-yu	3.346	3.337	3.337	3.340	2.551	2.538	2.545	2.545	2.081	2.071	2.166	2.106
D1-D1'	Ki-pa	1.556	1.551	1.546	1.551	1.252	1.251	1.679	1.394	0.531	0.529	0.530	0.530
D2-D2'	Ki-pa	1.738	1.736	1.745	1.740	1.822	1.807	1.949	1.859	1.373	1.352	1.438	1.388
E-E'	Ki-pa	1.197	1.185	1.189	1.190	0.581	0.601	0.609	0.597	0.236	0.236	0.236	0.236
F-F'	Ki-pa	1.399	1.392	1.405	1.399	1.158	1.145	1.201	1.168	0.290	0.289	0.291	0.290
G-G'	Ks-yu	5.167	5.164	5.169	5.167	4.149	4.139	4.136	4.141	4.149	4.139	4.136	4.141
H-H'	Ks-yu2	1.416	1.409	1.413	1.413	0.565	0.576	0.565	0.569	0.460	0.460	0.654	0.525
I-I'	Ks-yu2	1.071	1.067	1.148	1.095	0.699	0.426	0.815	0.647	0.438	0.250	0.251	0.313
J-J'	Ks-yu2	1.307	1.295	1.293	1.298	0.606	0.645	0.738	0.663	0.224	0.224	0.225	0.224
K-K'	Ks-yu2	1.363	1.356	1.315	1.345	1.000	0.999	1.114	1.038	0.510	0.469	0.612	0.530
L-L'	Ks-yu2	2.257	2.258	2.138	2.218	2.088	2.076	2.089	2.084	0.558	0.581	0.563	0.567

		SLIDE v7							
PERFIL	MATERIAL	SIS. MAXIMA				SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA			
		SPEN	G/M-P	SAR	PROM	SPEN	G/M-P	SAR	PROM
A-A'	Ki-pa	1.122	1.097	1.104	1.108	0.774	0.761	0.932	0.822
B-B'	Ks-yu	2.934	2.908	2.898	2.913	2.311	2.285	2.315	2.304
C-C'	Ks-yu	2.251	2.229	2.238	2.239	1.732	1.704	1.723	1.720
D1-D1'	Ki-pa	1.007	1.007	1.001	1.005	0.918	0.967	0.967	0.951
D2-D2'	Ki-pa	1.598	1.582	1.592	1.591	1.268	1.239	1.281	1.263
E-E'	Ki-pa	0.804	0.780	0.798	0.794	0.503	0.531	0.503	0.512
F-F'	Ki-pa	0.997	0.996	0.987	0.993	0.842	0.827	0.857	0.842
G-G'	Ks-yu	3.684	3.669	3.675	3.676	2.975	2.957	2.957	2.963
H-H'	Ks-yu2	0.992	0.963	0.975	0.977	0.253	0.254	0.257	0.255
I-I'	Ks-yu2	0.794	0.864	0.590	0.749	0.555	0.640	0.693	0.629
J-J'	Ks-yu2	0.878	0.848	0.871	0.866	0.559	0.545	0.850	0.651
K-K'	Ks-yu2	1.008	1.052	0.866	0.975	0.812	0.783	0.778	0.791
L-L'	Ks-yu2	1.763	1.557	1.565	1.628	1.276	1.253	1.277	1.269

4.1.2 FACTOR DE SEGURIDAD SEGÚN LAS CONDICIONES Y MÉTODOS UTILIZADOS EN EL SLIDE v7

- **FORMACIÓN PARIATAMBO (Ki-pa)**

En esta formación se analizaron 5 perfiles (A-A', D1-D1', D2-D2', E-E', F-F') en condiciones normales, saturación media, saturación total, sismicidad máxima, saturación media y sismicidad máxima, para cada una de estas condiciones se aplicó 3 métodos, el de Spencer(1967) , GLE/morgenstem-Price(1965) y Sarma(1973), dichos métodos darán resultados del factor de seguridad(FS) para cada uno de los perfiles, teniendo en cuenta el rango de valores para el FS, como se muestra a continuación.

Tabla 17.factor de seguridad-Ki-pa

FS		
	<0.5	Inestable absoluto
	0.5 - 1	Inestable relativo
	1 - 1.3	Estable relativo
	1.3 - 1.5	Estable temporalmente
	1.5 - 3	Estable permanente
	>3	Estable absoluto

- **Perfil A-A'**

Tabla 18.Perfil A-A'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	1.612	1.601	1.599
SAT. MEDIA	1.038	1.059	1.019
SAT. TOTAL	0.535	0.512	0.609
SIS. MAXIMA	1.122	1.097	1.104
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	0.774	0.761	0.932

Como se puede ver en las tablas para el perfil **A-A'** según el rango de valores del FS, está ubicado dentro de los valores 0.5 – 1 calificándolo como un talud inestable relativo, para una **saturación total** (para esta condición se agregó una carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo de la superficie del talud), y una **saturación media y sísmica máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud, una sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

- **Perfil D1-D1'**

Tabla 19.Perfil D1-D1'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	1.556	1.551	1.546
SAT. MEDIA	1.252	1.251	1.679
SAT. TOTAL	0.531	0.529	0.530
SIS. MAXIMA	1.007	1.007	1.001
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	0.918	0.967	0.967

Como se puede ver en las tablas para el perfil **D1-D1'** según el rango de valores del FS, está ubicado dentro de los valores 0.5 – 1, calificándolo como un talud inestable relativo, para una **saturación total** (para esta condición se agregó una carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo de la superficie del talud), y una **saturación media y sísmica máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud, una sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

- **Perfil D2-D2'**

Tabla 20.Perfil D2-D2'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	1.738	1.736	1.745
SAT. MEDIA	1.822	1.807	1.949
SAT. TOTAL	1.373	1.352	1.438
SIS. MAXIMA	1.598	1.582	1.592
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	1.268	1.239	1.281

- **Perfil E-E'**

Tabla 21.Perfil E-E'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	1.197	1.185	1.189
SAT. MEDIA	0.581	0.601	0.609
SAT. TOTAL	0.236	0.236	0.236
SIS. MAXIMA	0.804	0.780	0.798
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	0.503	0.531	0.503

Como se puede ver en las tablas para el perfil E-E' según el rango de valores del FS, está ubicado dentro de los valore 0.5 – 1, calificándolo como un talud inestable relativo para una

saturación **media** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud),

Valores <0.5, calificándolo como un talud Inestable absoluto, para una **saturación total** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo de la superficie del talud)

Valores entre 0.5 – 1 calificándolo como un talud inestable relativo para una **sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

Valores entre 0.5 – 1 calificándolo como un talud inestable relativo para **saturación media y sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud, una sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

- **Perfil F-F'**

Tabla 22.Perfil F-F'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	1.399	1.392	1.405
SAT. MEDIA	1.158	1.145	1.201
SAT. TOTAL	0.290	0.289	0.291
SIS. MAXIMA	0.997	0.996	0.987
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	0.842	0.827	0.857

Como se puede ver en las tablas para el perfil F-F' según el rango de valores del FS, tiene valores <0.5 calificándolo como un talud Inestable absoluto, para una **saturación total** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo de la superficie del talud).

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para una **sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para una **saturación media y sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud, una sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

- **YUMAGUAL (Ks-yu)**

En esta formación se analizaron 3 perfiles (B-B', C-C', G-G') en condiciones normales, saturación media, saturación total, sismicidad máxima, saturación media y sismicidad máxima, para cada una de estas condiciones se aplicó 3 métodos, el de Spencer(1967) , GLE morgenstem Price(1965) y Sarma(1973), dichos métodos darán resultados del factor de seguridad(FS) para cada uno de los perfiles, teniendo en cuenta el rango de valores para el FS, como se muestra a continuación .

Tabla 23.factor de seguridad-Ks-yu

FS		
	<0.5	Inestable absoluto
	0.5 - 1	Inestable relativo
	1 - 1.3	Estable relativo
	1.3 - 1.5	Estable temporalmente
	1.5 - 3	Estable permanente
	>3	Estable absoluto

- **Perfil B-B'**

Tabla 24.Perfil B-B'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	4.454	4.444	4.427
SAT. MEDIA	3.444	3.427	3.480
SAT. TOTAL	3.036	3.022	3.069
SIS. MAXIMA	2.934	2.908	2.898
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	2.311	2.285	2.315

- **Perfil C-C'**

Tabla 25.Perfil C-C'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	3.346	3.337	3.337
SAT. MEDIA	2.551	2.538	2.545
SAT. TOTAL	2.081	2.071	2.166
SIS. MAXIMA	2.251	2.229	2.238
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	1.732	1.704	1.723

- **Perfil G-G'**

Tabla 26.Perfil G-G'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	5.167	5.164	5.169
SAT. MEDIA	4.149	4.139	4.136
SAT. TOTAL	4.149	4.139	4.136
SIS. MAXIMA	3.684	3.669	3.675
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	2.975	2.957	2.957

Para los 3 perfiles (B-B', C-C', G-G'), teniendo en cuenta el rango de valores del factor de seguridad ubicados dentro de los valores: 1.5-3, >3, están calificados como taludes estables permanentes y estables absolutos.

- **YUMAGUAL (Ks-yu2)**

En esta formación se analizaron 4 perfiles (H-H', I-I', J-J', K-K', L-L') en condiciones normales, saturación media, saturación total, sismicidad máxima, saturación media y sismicidad máxima, para cada una de estas condiciones se aplicó 3 métodos, el de Spencer(1967) , GLE morgenstem Price(1965) y Sarma(1973), dichos métodos darán resultados del factor de seguridad(FS) para cada uno de los perfiles, teniendo en cuenta el rango de valores para el FS, como se muestra a continuación .

Tabla 27.factor de seguridad-Ks-yu2

FS		
	<0.5	Inestable absoluto
	0.5 - 1	Inestable relativo
	1 - 1.3	Estable relativo
	1.3 - 1.5	Estable temporalmente
	1.5 - 3	Estable permanente
	>3	Estable absoluto

- **Perfil H-H'**

Tabla 28.Perfil H-H'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	1.416	1.409	1.413
SAT. MEDIA	0.565	0.576	0.565
SAT. TOTAL	0.460	0.460	0.654
SIS. MAXIMA	0.992	0.963	0.975
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	0.253	0.254	0.257

Como se puede ver en las tablas para el perfil E-E' según el rango de valores del FS, está ubicado dentro de los valores 0.5 – 1 calificándolo como un talud inestable relativo para una **saturación media** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud).

Valores entre 0.5–1, <0.5 calificándolo como un talud inestable relativo e inestable absoluto, para una **saturación total** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo de la superficie del talud).

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para una **sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

Valores <0.5 calificándolo como un talud inestable absoluto para una **saturación media y sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud, una sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

- **Perfil I-I'**

Tabla 29.Perfil I-I'

	 SPEN 	 G/M-P 	 SAR
 CONDICIONES NORMALES 	1.071	1.067	1.148
 SAT. MEDIA 	0.699	0.426	0.815
 SAT. TOTAL 	0.438	0.250	0.251
 SIS. MAXIMA 	0.794	0.864	0.590
 SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA 	0.555	0.640	0.693

Valores entre 0.5–1, <0.5 calificándolo como un talud inestable relativo e inestable absoluto para **saturación media** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud).

Valores <0.5, calificándolo como un talud inestable absoluto para una **saturación total** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo de la superficie del talud).

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para una **sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para **saturación media y sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud, una sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

- **Perfil J-J'**

Tabla 30.Perfil J-J'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	1.307	1.295	1.293
SAT. MEDIA	0.606	0.645	0.738
SAT. TOTAL	0.224	0.224	0.225
SIS. MAXIMA	0.878	0.848	0.871
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	0.559	0.545	0.850

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para **saturación media** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud). Valores <0.5 calificándolo como un talud inestable absoluto para **saturación total** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo de la superficie del talud).

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para **sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para **saturación media y sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud, una sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

- **Perfil K-K'**

Tabla 31.Perfil K-K'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	1.363	1.356	1.315
SAT. MEDIA	1.000	0.999	1.114
SAT. TOTAL	0.510	0.469	0.612
SIS. MAXIMA	1.008	1.052	0.866
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	0.812	0.783	0.778

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para **saturación media** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud).

Valores entre 0.5–1, <0.5 calificándolo como un talud inestable relativo e inestable absoluto para **saturación total** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo de la superficie del talud).

Valores entre 0.5–1 para **sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para **saturación media y sismicidad máxima** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo del talud, una sismicidad vertical de 0.132 y horizontal de 0.263 a lo largo del talud).

- **Perfil L-L'**

Tabla 32.Perfil L-L'

	SPEN	G/M-P	SAR
CONDICIONES NORMALES	2.257	2.258	2.138
SAT. MEDIA	2.088	2.076	2.089
SAT. TOTAL	0.558	0.581	0.563
SIS. MAXIMA	1.763	1.557	1.565
SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA	1.276	1.253	1.277

Valores entre 0.5–1 calificándolo como un talud inestable relativo para **saturación total** (para esta condición se agregó una capacidad de carga de 350.00 KN/m2, adicionamos el nivel freático a lo largo de la superficie del talud).

4.1.3 PROMEDIO DEL FS PARA CADA UNO DE LOS MÉTODOS

Para obtener estos valores se promedió el factor de seguridad de cada uno de los métodos obteniendo un valor promedio que a continuación se muestra en la tabla.

Tabla 33: Resumen de los factores de seguridad en diferentes condiciones.

PERFIL	MATERIAL	CONDICIONES NORMALES	SAT. MEDIA	SAT. TOTAL	SIS. MAXIMA	SAT. MEDIA Y SIS. MAXIMA
		PROM	PROM	PROM	PROM	PROM
A-A'	Ki-pa	1.604	1.039	0.552	1.108	0.822
B-B'	Ks-yu	4.442	3.450	3.042	2.913	2.304
C-C'	Ks-yu	3.340	2.545	2.106	2.239	1.720
D1-D1'	Ki-pa	1.551	1.394	0.530	1.005	0.951
D2-D2'	Ki-pa	1.740	1.859	1.388	1.591	1.263
E-E'	Ki-pa	1.190	0.597	0.236	0.794	0.512
F-F'	Ki-pa	1.399	1.168	0.290	0.993	0.842
G-G'	Ks-yu	5.167	4.141	4.141	3.676	2.963
H-H'	Ks-yu2	1.413	0.569	0.525	0.977	0.255
I-I'	Ks-yu2	1.095	0.647	0.313	0.749	0.629
J-J'	Ks-yu2	1.298	0.663	0.224	0.866	0.651
K-K'	Ks-yu2	1.345	1.038	0.530	0.975	0.791
L-L'	Ks-yu2	2.218	2.084	0.567	1.628	1.269

Para la FORMACION PARIATAMBO los valores de FS están entre, <0.5, 0.5–1 calificándolo como un talud inestable absoluto e inestable relativo respectivamente.

Para la FORMACION YUMAGUAL según los valores del FS se lo califica como taludes estables.

Para la FORMACION YUMAGUAL 2 los valores de FS están entre, <0.5, 0.5–1 calificándolo como un talud inestable absoluto e inestable relativo respectivamente.

4.2 CONTRASTACIÓN CON LA HIPÓTESIS

Con los parámetros encontrados de la carretera Encañada – Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000 se afirma la hipótesis inicialmente planteada que los taludes presentan inestabilidad teniendo en cuenta las características litológicas y variables desencadenantes como Condiciones normales (el desencadenante es la misma gravedad $g=9.8\text{m/s}^2$), Sismicidad máxima (condicionado por la máxima aceleración del terreno, sismicidad vertical de 0.132 y sismicidad horizontal de 0.263), Saturación: nivel freático (media a mitad de la altura del material crítico, a la altura de la topografía superficial con $H_{\text{min}}=41.809\text{m}$ y $H_{\text{max}}=134.609\text{m}$ según sea la altura del talud) que disminuyen las óptimas condiciones de estos puntos críticos, manifestándose en sus factores de seguridad menores a la unidad.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La evaluación geomecánica de los taludes de la carretera Encañada - Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000, determina macizos rocosos homogéneo y heterogéneos.

A través del cartografiado geológico se determinó el tipo de litología (ki-pa, Ks-yu, Qh-al, Qh-de, Qh-fl) que presenta de la carretera Encañada - Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000.

Se determinó las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso para la Formación Pariatambo tipo de macizo=heterogéneo, estimación de parámetro entrada $\sigma(c_i) = 15$, $g_{si} = 33$, $m_i = 9$. Para la Formación Yumagual tipo de macizo=homogéneo, estimación de parámetro entrada $\sigma(c_i) = 35$, $g_{si} = 52$, $m_i = 10$. Para la Formación Yumagual 2 tipo de macizo=homogénea estimación de parámetro entrada $\sigma(c_i) = 15$, $g_{si} = 37$, $m_i = 10$ y densidad seca=2450 kg/m³, porosidad=0.11, densidad saturada=2560 kg/m³, altura promedio taludes=50m para dichas formaciones.

El factor de seguridad para tramos inestables está entre, 0.5–1 y <0.5, para cada uno de los perfiles realizados de la carretera Encañada - Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000, y teniendo en cuenta el rango de valores del FS los taludes tienen un comportamiento inestable.

Se elaboró un mapa geomecánico teniendo en cuenta los valores promedios del factor de seguridad de cada uno de los perfiles, de esta manera se determinó las zonas inestables de la carretera Encañada - Celendín en el tramo km. 32+000- km. 46+000.

5.2 RECOMENDACIONES

Realizar ensayos de laboratorio como: Ensayos triaxiales para determinar con más exactitud la resistencia de la roca al corte.

Se recomienda a la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones Monitorear periódicamente las estaciones geomecánicas críticas para verificar su comportamiento ya que encuentran expuestas a variables desencadenantes (gravidad, sismicidad, saturación-nivel freático).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIAGA M. (2003). “Estudio Geológico - Geotécnico para la Rehabilitación de la Carretera Corral Quemado - Rio Nieva Tramo I: Puerto Naranjitos - Pedro Ruiz”

BRAJA. M. DAS (1984). “Fundamentos De La Ingeniería Geotécnica”. Mexico: Thomson.

BRAJA. M. DAS (2001). “Fundamentos De La Ingeniería Geotécnica”. Mexico: Thomson.

GAVILANES et al (2004), “Introducción a la Ingeniería de Túneles”

E.HOEK, C.CARRANZA-TORES, B.CORKUM. (2002). “Criterio De Rotura De Hoek-Brown. Minesota”.

LARA M. & SEPULVEDA S. (2008), “Remoción de masas. Departamento de Geología”.

REYES L. (1980). Boletín N° 31, “Cuadrángulo de Cajamarca - San Marcos – Cajabamba”.

SAMPIERI, A. (2010), “Metodología de la Investigación Científica. Diseños con hipótesis explicativas”.

SUAREZ, J. (2009) “Deslizamientos: Análisis Geotécnico”.

VALLEJO L. Et. Al, (2004). “Ingeniería Geológica”

ZAVALA, B. & ROSADO M. (2011) “Riesgo Geológico en la Región de Cajamarca”

ANEXOS

A. TABLA –DIAGRAMA DE TRANSICIÓN DE UN MACIZO ROCOSO INTACTO A UNO FUERTEMENTE FRACTURADO.

B. TABLAS DE REGISTRO EN CAMPO

C. PLANOS

- **P-01: Plano de Ubicación**
- **P-02: Plano Satelital**
- **P-03: Plano de Topográfico**
- **P-04: Plano de Pendientes**
- **P-05: Plano de Geológico**
- **P-06: Plano de Resultados en Condiciones Normales**
- **P-07: Plano de Resultados de Saturación Media**
- **P-08: Plano de Resultados de Saturación Total**
- **P-09: Plano de Resultados de Sismicidad máxima**
- **P-10: Plano de Resultados de Saturación Media y Sismicidad máxima**

D. PERFILES

E. ANÁLISIS CON EL SOFTWARE ROCDATA V5

F. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE SLIDE V7.

A. TABLA –DIAGRAMA DE TRANSICIÓN DE UN MACIZO ROCOSO INTACTO A UNO FUERTEMENTE FRACTURADO.

