

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



**TESIS PROFESIONAL**

**EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES DE LA CARRETERA**  
**CAJAMARCA – CIUDAD DE DIOS EN EL TRAMO Km.142+000 – Km.150+000**

Para optar el título profesional de:

**Ingeniero Geólogo**

Presentado Por:

**Bach. Percy Omar Salazar Sáenz**

Asesor:

**Ing. Roberto Severino Gonzales Yana**

Cajamarca – Perú

**2018**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi Alma Mater, Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Facultad de Ingeniería a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica por ser la cuna y hogar para mi crecimiento profesional, a mis docentes por todas sus enseñanzas y el apoyo brindado para abrirme paso hacia el desarrollo profesional.

A mis padres, hermanos, novia y amigos por el apoyo desinteresado de principio a fin que me han mostrado en momentos de emprendimiento y superación personal.

Agradezco a mi asesor de Tesis, al Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, ya que sin su apoyo ésta, no hubiera sido posible.

## **DEDICATORIA**

Esta tesis la dedico a mi novia Consuelo del Milagro Ulloa Olano, a mis padres Ricardina Violeta Sáenz Céspedes y Teófilo Salazar Vigo, a mis hermanos Edgar Eduardo Salazar Sáenz y Luis David Salazar Sáenz. Y a todos los que me alentaron a seguir adelante, nunca rendirme y ser una persona de bien en la vida.

## RESUMEN

Se analizó la estabilidad de los taludes de la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios en el tramo km.142+000 - km.150+000 ubicado al suroeste de la ciudad de Cajamarca, la cual es de vital importancia para muchos poblados, incluso para la capital departamental Cajamarca. Geológicamente, existen afloramientos del Cretácico Inferior (Formaciones Farra, Carhuaz, Inca, Chúlec y Pariatambo) y Superior (Formaciones Yumagual, Quilquiñan-Mujarrún y Cajamarca), unidades muy heterogéneas en términos de propiedades geotécnicas (Resistencia a la compresión uniaxial (kPa), Índice Geológico de Resistencia (GSI)). El constante tránsito de vehículos pesados crea vibraciones, las precipitaciones pluviales, la infiltración y los fuertes cambios de temperatura de 3° a 22° alteran la estructura de las rocas, produciendo cambios en las propiedades de las rocas y produciendo disminución de esfuerzos de resistencia; y así produciendo la inestabilidad en los taludes. Los suelos coluviales existentes tienen propiedades geomecánicas directamente relacionados al macizo rocoso infrayacente; así, los suelos en las unidades sedimentarias clásticas son de baja cohesión, y los suelos en las unidades carbonatadas son de alta cohesión. En la etapa de campo se identificó 7 zonas críticas, las mismas que se analizaron con los softwares Dips (para zonas con mayor presencia del macizo rocoso) y Slide (para zonas con mayor presencia de suelos), con el fin de determinar el nivel de estabilidad en diversos escenarios; encontrando que estas zonas necesitan la implementación de medidas de estabilidad en lo más pronto posible para evitar que la integridad de los usuarios de la vía se vea afectada.

**Palabras Claves:** Taludes, estabilidad, factor de seguridad, análisis cinemático, equilibrio límite.

## ABSTRACT

The stability of the slopes of the Cajamarca - Ciudad de Dios highway was analyzed in the km.142 + 000 - km.150 + 000 section; is located at the southwest of the city of Cajamarca, which is of vital importance for many towns, even for Cajamarca, the departmental capital. Geologically, there is the presence of lower Cretaceous units (Farra, Carhuaz, Inca, Chúlec and Pariatambo formations) and superior (Yumagual, Quilquiñan-Mujarrún and Cajamarca formations), very heterogeneous units in terms of geotechnical properties (Uniaxial compression resistance (kPa), Geological Resistance Index (GSI)). The constant traffic of heavy vehicles creates vibrations, Rainfall, the infiltration and the strong changes of temperature of 3 ° to 22 ° alter the structure of the rocks, producing changes in the properties of the rocks and producing a decrease in resistance efforts; and thus producing instability in the slopes. The existing colluvial soils have geomechanical properties directly related to the underlying rock mass; thus, the soils in the clastic sedimentary units are of low cohesion, and the soils in the carbonated units are of high cohesion. In the field stage, 7 potentially critical zones were identified, the same ones that were analyzed with the Dips software (for areas with greater presence of the rock masses) and Slide (for areas with greater presence of soils), in order to determine their level of stability in various scenarios; finding that these areas need the implementation of stability measures as soon as possible to prevent the integrity of road users is affected.

**Keywords:** Slopes, stability, safety factor, kinematic analysis, limit equilibrium.

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
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. Factores geológicos y problemas geotécnicos.....	4
2.2.2. Métodos de clasificación de los macizos rocosos .....	6
2.2.3. Criterios de rotura.....	9
2.2.4. Análisis de taludes .....	14
2.2.5. Geodinámica.....	17
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	20
CAPÍTULO III .....	22
MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA. ....	22
3.2. ACCESIBILIDAD. ....	22
3.3. CLIMA .....	23
3.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	23
3.4.1. Tipo y Método de investigación .....	23
3.4.2. Población de estudio.....	24
3.4.3. Muestra. ....	24
3.4.4. Unidad de análisis.....	24
3.4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	24
3.4.6 Análisis e interpretación de datos .....	26
3.5. PROCEDIMIENTO .....	26
3.5.1. Etapa de gabinete.....	26
3.5.2. Etapa de campo.....	27
3.5.2. Etapa final.....	27
3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS .....	27
3.7. GEOLOGÍA LOCAL .....	28
3.7.1. Grupo Goyllarisquizga .....	28

	<b>Pág.</b>
3.7.2. Grupo Crisnejas .....	28
3.7.3. Grupo Pulluicana .....	29
3.7.4. Formación Cajamarca.....	29
3.8. GEOMORFOLOGÍA. ....	29
3.8.1. Unidades Geomorfológicas por Proceso Morfoestructural. ....	29
3.8.2. Unidades Geomorfológicas por Proceso Denudacional. ....	30
3.8.3. Unidades Geomorfológicas por Proceso Fluvial. ....	31
3.8.4. Pendientes. ....	31
3.8.5. Red de drenaje y quebradas. ....	32
3.9. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL. ....	33
3.10. GEOTECNIA .....	33
3.10.1. Tramo 01 .....	33
3.10.2. Tramo 02 .....	42
3.10.3. Tramo 03 .....	45
3.10.4. Tramo 04 .....	49
3.10.5. Tramo 05 .....	58
3.10.6. Tramo 06 .....	62
3.10.7. Tramo 07 .....	71
CAPÍTULO IV .....	81
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	81
4.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	81
4.1.1. Estaciones analizadas frente a rotura en suelos .....	81
4.1.2. Estaciones analizadas frente a rotura del macizo rocoso.....	82
4.2. CONTRASTACIÓN CON LA HIPÓTESIS.....	83
CAPÍTULO V .....	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	84
5.1. CONCLUSIONES.....	84
5.2. RECOMENDACIONES .....	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	86
ANEXOS .....	88

**FIGURAS****Pág.**

Figura 1. Representación del criterio de Hoek y Brown, en el espacio de tensiones normal y tangencial. (Gavilanes 2004).....	11
Figura 2. Envolvente de falla, criterio de Mohr – Coulomb. (Lambe & Whitman 1972).	13
Figura 3. Dirección de esfuerzos principales en la falla de un talud. (Lambe & Whitman 1972).....	14
Figura 4. Tipos de superficies de rotura en suelos. (Gonzales de Vallejo 2002).....	15
Figura 5. Condiciones para la rotura plana. (Gonzales de Vallejo 2002).....	16
Figura 6. Tipos de rotura plana. (Gonzales de Vallejo 2002). ....	16
Figura 7. Condiciones para la rotura en cuña. (Gonzales de Vallejo 2002).....	17
Figura 8. Formas de movimiento para caídas de rocas. (Hoek 2000). ....	18
Figura 9. a) Movimiento simple, b) Movimiento múltiple, c) Movimiento sucesivo (Hutchinson 1968). ....	19
Figura 10. Nomenclatura de las partes de un deslizamiento. (Highland & Jhonson, 2004).....	20
Figura 11. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en la arenisca de la Fm. Farrat .....	35
Figura 12. Interpretación en RocData del tramo 02. ....	45
Figura 13. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las Calizas bituminosas de la Formación Pariatambo.....	47
Figura 14. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las margas gris parduzcas de la Formación Yumagual. ....	48
Figura 15. Interpretación en RocData del tramo 03. ....	49
Figura 16. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las margas gris parduzcas de la Formación Yumagual en el tramo 04. ....	51
Figura 17. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las margas gris parduzcas de la Formación Yumagual en el tramo 05. ....	60
Figura 18. Interpretación en RocData del tramo 05. ....	61

Figura 19. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las calizas grises oscuras o azuladas de la Fm. Cajamarca en el tramo 06.....	64
Figura 20. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las calizas grises oscuras o azuladas de la Fm. Cajamarca en el tramo 07.....	73

## FOTOS

Foto 1. Talud en el tramo 01, Km. 149+670 – Km. 149+720 .....	34
Foto 2. Talud en el tramo 02, Km. 149+280 – Km.149+330. ....	42
Foto 3. Talud en el tramo 03, Km.148+400 – Km.148+600. ....	46
Foto 4. Talud en el tramo 04, Km.148+110 – Km.148+160 .....	50
Foto 5. Talud en el tramo 05, Km.146+500 – Km.146+650 .....	58
Foto 6. Talud en el tramo 06, Km.146+200 – Km.146+280. ....	62
Foto 7. Talud en el tramo 07, Km.145+570 – Km.145+620. ....	71

## TABLAS

Tabla 1. Influencia de la litología en el comportamiento geotécnico del terreno (Gonzáles de Vallejo 2002) .....	5
Tabla 2. Estructuras geológicas y problemas geotécnicos. (Gonzáles de Vallejo 2002) ..	5
Tabla 3. Procesos geológicos en relación al agua.(Gonzáles de Vallejo 2002) .....	6
Tabla 4. Clasificación geomecánica de GSI – Hoek. (Hoek 1994).....	7
Tabla 5. Clasificación Geomecánica para taludes SMR. (Romana 1988). ....	8
Tabla 6. Coordenadas del límite de estudio.....	22
Tabla 7. Ubicación Política. ....	22
Tabla 8. Ruta de acceso a la zona de estudio.....	23
Tabla 9. Estación Weberbauer.....	23
Tabla 10. Estimación del índice GSI en base a descripciones geológicas (Hoek y Brown 1997).....	25

Tabla 11. Propiedades del macizo rocoso del tramo 01. ....	34
Tabla 12. Información resumida de discontinuidades de la estación 1. ....	35
Tabla 13. Resumen de los resultados del análisis de la estación 1. ....	42
Tabla 14. Propiedades del macizo rocoso del tramo 02. ....	43
Tabla 15. Propiedades del suelo del tramo 02. ....	44
Tabla 16. Propiedades del macizo rocoso del tramo 03. ....	46
Tabla 17. Propiedades del suelo del tramo 03. ....	48
Tabla 18. Propiedades del macizo rocoso del tramo 04. ....	50
Tabla 19. Información resumida de discontinuidades de la estación 4. ....	51
Tabla 20. Resumen de los resultados del análisis de la estación 4. ....	58
Tabla 21. Propiedades del macizo rocoso del tramo 05. ....	59
Tabla 22. Propiedades del suelo del tramo 05. ....	61
Tabla 23. Propiedades del macizo rocoso del tramo 06. ....	62
Tabla 24. Información resumida de discontinuidades de la estación 6. ....	64
Tabla 25. Resumen de los resultados del análisis de la estación 6. ....	71
Tabla 26. Propiedades del macizo rocoso del tramo 07. ....	72
Tabla 27. Información resumida de discontinuidades de la estación 7. ....	73
Tabla 28. Resumen de los resultados del análisis de la estación 7. ....	80
Tabla 29. Coordenadas de la ubicación de las estaciones geotécnicas 2, 3 y 5 , conformados principalmente por suelos. ....	81
Tabla 30. Factores de seguridad calculados en las estaciones de suelos, en amarillo . las condiciones estables, pero con diseño no aceptable (factor de seguridad inferior . a la normativa) y en naranjado los taludes inestables (los taludes fallaran si se . presenta ese estado). ....	82
Tabla 31. Ubicación de las estaciones analizadas frente a rotura del macizo rocoso. ....	82
Tabla 32. Resultados del análisis de las estaciones en macizos rocosos, se resalta de . amarillo las probabilidades mayores a 0% y menores a 50%, y en rojo las mayores . a 50%. ....	83

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

Este estudio será abordado desde la ciencia Geológica orientado a la Geotecnia y se relaciona con los Peligros Geológicos. Las amenazas naturales tales como los deslizamientos, son un problema que genera retrocesos en las actividades sociales y económicas. En la zona de estudio se encuentran afloramientos rocosos y depósitos cuaternarios, las cuales están fuertemente meteorizadas, dando lugar a condiciones geodinámicas inestables en los taludes de la carretera, siendo de vital importancia definir las características geomecánicas a lo largo del eje de la carretera, para determinar los factores de seguridad y las posibilidades de mejorarlos.

Es por ello que el investigador se genera la incógnita: ¿Cuál es el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos y suelos con la inestabilidad de los taludes en el área de estudio?; el desarrollo y éxito de la presente investigación, implica comprobar una respuesta anticipada, que para el caso, se estructura de la siguiente manera: Las características litomorfoestructurales determinan el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos y los depósitos cuaternarios en el tramo km.142+000 - km.150+000 de la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios, debido a la variable detonante como es la pendiente la cual provoca la inestabilidad de los taludes.

El tramo de estudio de la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios está totalmente asfaltada y construida sobre rocas del Cretáceo Inferior y Superior constituida por rocas: margosas, calcáreas, areniscosas y limolíticas; y con poca conservación de taludes en suelos y rocas, los cuales se encuentran mayormente en condiciones inestables debido a que los taludes

no tienen el mantenimiento adecuado y asociado con las vibraciones generadas por el continuo tránsito de vehículos pesados los cuales afectan a los taludes, generando la interrupción en el tránsito continuo y afectando seriamente a la provincia de Cajamarca; con este estudio se busca determinar el comportamiento litomorfoestructural, la identificación de los factores que controlan y propician las condiciones geomecánicas, para conocer las características geotécnicas de los taludes en el tramo de estudio de la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios, siendo la investigación de tipo transversal y de tipo analítico. Teniendo un tiempo de duración de 4 meses para realizar la investigación, de agosto hasta noviembre de 2016.

Por lo que el objetivo principal de la presente investigación, es evaluar el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos y suelos del área de estudios para definir la inestabilidad de los taludes. Basados en algunos fines que darán realce y mayor veracidad de la presente; como: Definir las propiedades geotécnicas y geológicas del macizo rocoso y depósitos cuaternarios, identificar el comportamiento geomecánico y geotécnico de los taludes de la carretera, calcular los factores de seguridad de las zonas críticas mediante el software Slide y Determinar las zonas de peligros correspondientes a las áreas críticas por inestabilidad de taludes.

Los capítulos de la presente investigación se ordenan de la siguiente manera: en el primer capítulo se muestra una introducción al tema a investigar, en el segundo capítulo se muestra los antecedentes a nivel internacional, nacional y local del tema a investigar términos, así como conceptos y teorías empleados, y la definición de términos básicos. En el tercer capítulo se muestra el método de trabajo para la investigación, siguiendo un estricto cronograma de trabajo en gabinete y campo, en ésta fase se lleva a cabo la recopilación de los datos que servirán como fundamento de la presente investigación, en el cuarto capítulo se aborda el análisis y discusión de resultados a los cuales se han llegado durante el procesamiento de datos obtenidos en campo. En el capítulo cinco se muestra las conclusiones y resultados a los cuales se han llegado durante la ejecución del proyecto a investigar.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

**Marcuzzi (2009).** Propuesta Metodológica para la Caracterización Geotécnica de los Taludes Rocosos del Camino de Acceso al Cerro San Bernardo, Ciudad de Salta. Donde realiza un análisis de la estabilidad de los taludes y laderas del camino de acceso al cerro San Bernardo que cumple con una innegable función social, cuya demanda de uso se incrementa en el tiempo. Además, concluye que con la clasificación de los macizos rocosos y taludes por medio de los métodos MRM y SMR, estos determinan su comportamiento geomecánico y la susceptibilidad al deslizamiento volcada sobre la cartografía base de la traza de la carretera, determinando así una zonificación del camino de acceso al cerro San Bernardo.

**Granados (2006).** Estabilización del talud de la Costa Verde en la zona del distrito de Barranco-Lima. La Tesis desarrolla el análisis y diseño de ingeniería, así como el presupuesto de una solución para estabilizar, bajo las condiciones críticas de un sismo, un tramo representativo de 560 metros de longitud del talud de la Costa Verde. Esta Tesis demuestra que el tramo en estudio fallaría en condiciones sísmicas importantes, además de proponer soluciones de estabilización del talud de la Costa Verde en las zonas que lo requieran luego de un estudio profundo. También se llegó a la conclusión que la remediación significa un proyecto de envergadura con una inversión no menor a los 10 millones de soles y un tiempo de ejecución superior a los 24 meses.

**Ingemmet (2011).** Riesgos geológicos en la región de Cajamarca, en el ámbito regional como parte de las cuencas medio-altas de la vertiente pacífica, donde se evaluó la ocurrencia de peligros geológicos y geohidrológicos relacionados a procesos de geodinámica externa (movimientos en masa e inundaciones), y en menor porcentaje a sismos.

**Mercado (2014).** Análisis de inestabilidad de taludes en zonas críticas en la carretera Cajamarca – Celendín en el tramo Km. 52+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. Concluye que el principal agente de erosión es el agua, ya que funciona como lubricante y favorece la cinemática de los macizos rocosos mediante la infiltración en las formaciones Pariatambo, Cajamarca y el Grupo Quilquiñan.

**Montoya (2014).** Evaluación geotecnia de los taludes de la carretera Cruz Blanca – El Gavilán, donde estudia la inestabilidad de los taludes de la carretera, teniendo en cuenta el contexto geológico local, regional y su relación estrecha que existen con los agentes geodinámicos, además se establece las diferencias entre los factores de seguridad de los taludes calculados con esfuerzos totales, efectivos y un factor sísmico. Pues concluye en un decremento hasta del 98% de su factor de seguridad. También identifica zonas críticas altamente peligrosas, sectorizando y caracterizando por tramos los problemas de índole geotécnico.

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. Factores geológicos y problemas geotécnicos**

La diversidad de medio geológico y la complejidad de sus procesos hacen que en las obras de Ingeniería se deban resolver situaciones donde los factores geológicos son condicionantes de un proyecto.

En las Tablas 1 y 2 se presentan las posibles influencias de la litología y la estructura geológica sobre el comportamiento geotécnico de los materiales rocosos y suelos, mientras que en la Tabla 3, se indica como el agua y los materiales son afectados por los

diferentes procesos geológicos, dando lugar a problemas geotécnicos. En resumen, se deduce las siguientes conclusiones. (González, 2002).

Los factores geológicos son la causa de la mayoría de los problemas Geotécnicos.

El agua es uno de los factores de mayor incidencia en el comportamiento geotécnico de los materiales.

Los procesos geológicos pueden modificar el comportamiento de los materiales, incidiendo sobre el medio físico, y ocasionar problemas geotécnicos.

Tabla 1. Influencia de la litología en el comportamiento geotécnico del terreno.

<b>Litología</b>	<b>Factores característica</b>	<b>Problemas geotécnicos</b>
Rocas duras	-Minerales duros y abrasivos	-Abrasividad -Dificultad de arranque
Rocas blandas	-Resistencia media a baja -Minerales alterables	-Roturas en taludes -Deformabilidad en túneles -Cambio de propiedades con el tiempo
Suelos duros	-Resistencia media a alta	-Problemas en cimentaciones con arcillas expansivas y estructuras colapsables
Suelos blandos	-Resistencia baja a muy baja	-Asientos en cimentaciones -Roturas en taludes
Suelos orgánicos y biogénicos	-Alta compresibilidad -Estructuras inestables	-Subsidencia y colapsos

Tabla 2. Estructuras geológicas y problemas geotécnicos.

<b>Estructuras Geológicas</b>	<b>Factores característicos</b>	<b>Problemas geotécnicos</b>
Fallas y fracturas	-Superficies muy continuas; espesor variable.	Roturas, inestabilidad, acumulación e tensiones, filtraciones y alteraciones.
Planos de estratificación	-Superficies continuas; poca separación.	Roturas, inestabilidad y filtraciones.
Discontinuidades	-Superficies poco continuas, cerradas o poco separadas	Roturas, inestabilidad y filtraciones y alteraciones.
Pliegues	-Superficies de gran continuidad	Inestabilidad, filtraciones y tensiones condicionadas a la orientación.
Foliación, esquistosidad	-Superficies poco continuas y cerradas	Anisotropía en función de la orientación.

Fuente: (González de Vallejo 2002).

Tabla 3. Procesos geológicos en relación al agua.

Procesos geológicos en relación al agua	Efectos sobre materiales	Problemas geotécnicos
Disolución	-Pérdida de material en rocas y suelos solubles. - Karstificación	- Cavidades - Hundimientos - Colapsos
Erosión-Arrastre	-Pérdida de material y lavado -Erosión interna -Acarcavamientos	- Hundimientos y colapsos - Asientos -Sifonamientos y socavaciones -Aterramientos
Reacciones químicas	Cambios en la composición química	-Ataque a cementos, áridos, metales y rocas
Alteraciones	Cambio de propiedades físicas y químicas	-Pérdida de resistencia -Aumento de deformabilidad y permeabilidad

Fuente: (González de Vallejo 2002).

## 2.2.2. Métodos de clasificación de los macizos rocosos

### 2.2.2.1. (RQD) Designación De Calidad De La Roca.

El índice RQD fue propuesto para proveer un estimado cuantitativo de la calidad de la masa rocosa, a partir de los testigos de diamantina. Palmstrom (1982) sugirió que, cuando los testigos no estén disponibles para la traza de discontinuidades; expresando el grado de fracturación, partir de cartografiado geotécnico en función al número de fracturamiento por metro cúbico, determinadas al realizar el levantamiento litológico – estructural en área o zona determinada. (Deere 1967).

Ecuación 1.

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

### 2.2.2.2. (RMR) Clasificación De La Masa De Roca.

La clasificación geomecánica (RMR), postulando actualizaciones en 1979 en el cual propone unos valores orientados para ambos parámetros en función de calidad del macizo rocoso dada por el índice RMR el cual permite estimar los parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo y mejorado en 1989 constituyendo un sistema de clasificación de los macizos rocosos que permiten a su vez relacionar el índice de calidad con los parámetros geotécnicos del macizo.

Entre las ventajas de emplear el RMR como método de clasificación, esta que su aplicación es bastante sencilla y los parámetros de clasificación se consiguen fácilmente a través de data obtenida de campo. (Bieniawski 1989)

### 2.2.2.3. (GSI) Índice Geológico de Resistencia.

Propuso el Índice Geológico de Resistencia (GSI), para evaluar la calidad del macizo rocoso en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de bloques y alteración de las discontinuidades. A partir de 1998 a la fecha se ha desarrollado el sistema GSI con el objetivo de incluir macizos rocosos de mala calidad (Hoek et al., 1998; Marinos y Hoek, 2000 y 2001). El GSI proporciona un sistema para estimar la disminución de la resistencia que presentaría un macizo rocoso con diferentes condiciones geológicas y se obtiene de la combinación de 2 parámetros geológicos, la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades. (Hoek 1994).

Tabla 4. Clasificación geomecánica de GSI – Hoek.

Calidad del Macizo	Clase	GSI
Muy mala	V	0 – 20
Mala	IV	21 – 40
Regular	III	41 – 60
Buena	II	61 – 80
Muy buena	I	81 – 100

Fuente: (Hoek 1994)

Además, es posible establecer una relación del GSI con el caso del RMR de 1989, la que ha sido establecida de manera empírica, siempre de forma aproximada, que se cumple la siguiente igualdad, (Hoek 1994):

Ecuación 2.

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

### 2.2.2.4. (SMR) Clasificación De Masa En Pendiente.

El índice SMR se utiliza para taludes que permite evaluar empíricamente la estabilidad de una excavación. A partir de la clasificación RMR básico sumando dos "factores de ajuste"; uno que es función de la orientación de las discontinuidades (y que es, a su vez,

producto de tres subfactores) y otro conocido como "factor de excavación", el cual depende del método utilizado. (Romana 1988)

Ecuación 3.

$$SMR = RMR + (F_1 + F_2 + F_3) + F_4$$

F1 depende del paralelismo entre el rumbo de las discontinuidades y de la cara del talud. Varía entre 1,00 (cuando ambos rumbos son paralelos) y 0,15 (cuando el ángulo entre ambos rumbos es mayor de 30° y la probabilidad de rotura es muy baja). Estos valores, establecidos empíricamente, se ajustan aproximadamente a la expresión:

Ecuación 4.

$$F_1 = [1 - (ad) - as]^2$$

Donde ad y as son los valores del buzamiento de la discontinuidad y del talud respectivamente.

Tabla 5. Clasificación Geomecánica para taludes SMR.

Factores de orientación de las juntas (F1, F2, F3)						
Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	aj - as	>30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	<5°
T	aj - as - 180					
P/T	F1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	βj	<20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	>45°
	F2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
P	βj - βs	>10°	10° - 0	0°	0° - (-10°)	<-10°
T	βj + βs	<110°	110° - 120°	>120°	-50	-50
P/T	F3	0.00	-6.00	-25.00		
Método de excavación						
Método	Talud natural	Pre-corte	Voladura suave	Voladura o excavación mecánica	Voladura deficiente	
F4	15	10	8	0	-8	
Clases de estabilidad						
Clase	V	IV	III	II	I	
SMR	0 - 20	21 - 41	41 - 60	61 - 80	81 - 100	
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena	
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable	
Roturas	Grandes roturas, planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas juntas	Algunos bloques	Ninguna	
Tratamiento	Re excavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno	

P: plano de rotura

T: rotura por vuelco

as: dirección del talud

aj: dirección de las juntas

βs: buzamiento del talud

βj: buzamiento de las juntas

Fuente: (Romana 1988).

F2 depende del buzamiento de la discontinuidad en la rotura plana. En cierto sentido es una medida de la probabilidad de la resistencia al esfuerzo de corte. Varía entre 1,00 (para discontinuidades con buzamiento superior a 45°) y 0,15 (para discontinuidades con buzamiento inferior a 20°). Fue establecido empíricamente, pero puede ajustarse aproximadamente según la relación:

Ecuación 5.

$$F_2 = [\tan^2(b\alpha)]^2$$

Donde  $b\alpha$  es el buzamiento de la discontinuidad F2 vale 1.00 para las roturas por vuelco.

F3 refleja la relación entre los buzamientos de la discontinuidad y el talud. Se han mantenido los valores propuestos por Bieniawski en 1976 que son siempre negativos.

F4 se determina dependiendo el método de excavación. Así el valor F4 asignado queda definido por la siguiente tabla.

### **2.2.3. Criterios de rotura**

#### **2.2.3.1. Criterios de Hoek y Brown.**

El criterio es válido para evaluar la resistencia de la matriz rocosa, siendo no lineal el criterio donde representa la gráfica de rotura siendo una curva de tipo cóncava. Desarrollado inicialmente para su aplicación a macizos rocosos fracturados sin alterar su matriz rocosa resistente.

Proponiendo Hoek (1985) el Índice Geológico de Resistencia GSI (Geological Strength Index), que evalúa la calidad del macizo en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades. Como consecuencia de problemas prácticos se tuvieron que introducir la idea de macizos “inalterados” y “alterados” por Hoek y Brown (1988), y la introducción de un criterio modificado para macizos de muy mala calidad con una tendencia a cero (0) (Hoek Wood y Shah, 1992). La resistencia del macizo rocoso está definida por la expresión (Hoek y Brown, 1980):

Ecuación 6.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + S}$$

Donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor respectivamente,  $\sigma_{ci}$  es la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, m y s son constantes adimensionales de Hoek y Brown para la roca del material, con  $s=1$  para roca intacta.

Los valores de la resistencia a la compresión uniaxial, m, s pueden ser obtenidos a partir de ensayos de compresión uniaxial ( $\sigma_{ci}$ ) y triaxiales (m, s, a). Estos últimos parámetros pueden obtenerse también a partir de observación en terreno y las siguientes relaciones (Hoek et al., 2002; considera casos particulares de estados tensionales en taludes y el factor de “disturbancia” sobre macizos rocosos):

Ecuación 7.

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

Ecuación 8.

$$S = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D9 - 3D}\right)$$

Ecuación 9.

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

Alternativamente, para valores de  $GSI > 25$  éste puede determinarse a partir del valor del RMR (Bieniawski, 1989), donde  $GSI = RMR89 - 5$ .

Para determinar el valor de m se requiere conocer  $m_i$ . Este último valor se obtiene a partir de ensayos de compresión uniaxial o bien se estima a través de Cuadros, donde se le asocia un valor de acuerdo al tipo de roca. En tanto, el valor de D es el llamado “factor de perturbación” y depende del grado de perturbación y relajación de stress de la roca y varía entre 0 (no perturbada) y 1 (muy perturbada) (Hoek et al., 2002).

Hoek (1990) trato la desviación de las resistencias cohesivas y de los ángulos de fricción equivalentes para diferentes situaciones prácticas. Estas deducciones se basaron en las tangentes a la envolvente de Mohr obtenida por Bray. Hoek (1994) sugirió que la resistencia cohesiva determinada al ajustar una tangente a la envolvente curvilínea de Mohr es un valor sobredimensionado y pueden dar unos resultados optimistas en los

cálculos de estabilidad. Consecuente, pueden ser más apropiados al ajustar una relación lineal de Mohr – Coulomb por método de mínimos cuadrados. Hoek y Brown (1997) intentaron consolidar todos los procesos anteriores en una presentación comprensiva del criterio de rotura.

En la Figura 01 se representa las tensiones de rotura para el criterio de rotura de Hoek y Brown. En la figura se aprecia que la función que define el dominio elástico es no lineal.

Tal y como se ha indicado para el criterio de rotura de Mohr-Coulomb los estados de tensiones encima de la curva están en rotura, mientras que los interiores están en el dominio elástico, y los estados tensionales por encima de la curva son inaccesibles para este determinado caso.

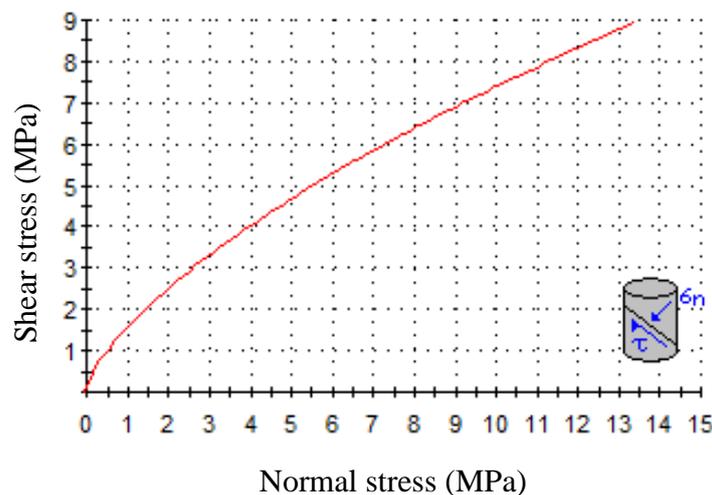


Figura 1. Representación del criterio de Hoek y Brown, en el espacio de tensiones normal y tangencial. (Gavilanes 2004)

### 2.2.3.2. Criterios de Mohr – Coulomb

El criterio de rotura Mohr – Coulomb, fue propuesto por primera vez por Coulomb en el año 1773, inicialmente pensado para el estudio en suelos, siendo un criterio lineal. Esto significa que la ecuación que define la superficie de fluencia es una línea recta. Para el criterio, se define la rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano.

Ecuación 10.

$$t = c' + \tan\phi'$$

Dónde:

$c'$  = la cohesión, en efectivas. Es una constante que representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada.

$\phi'$  = el ángulo de rozamiento interno.

$\tau$  = la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura.

$\sigma$  = la tensión normal que actúa en el plano de rotura.

Es un criterio lineal que es ampliamente usado para definir las condiciones de falla en un suelo, asumiendo el comportamiento lineal que éstos generalmente presentan. Entre los términos que lo componen, la cohesión es una medida de la adherencia entre las partículas que componen el suelo. En suelos granulares secos y saturados la cohesión se supone nula (“suelos no cohesivos”); el caso opuesto lo representan los suelos finos, especialmente las arcillas, en cuyo comportamiento la cohesión juega un rol primordial.

Por otro lado, el ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de roce entre partículas ( $\mu = \tan\phi$ ). El ángulo de fricción depende de varios factores como son: tamaño y forma de las partículas, granulometría y densidad. Lambe & Whitman (1972).

De esta forma, la recta definida genera una envolvente sobre los círculos que representan el comportamiento del suelo ante las sollicitaciones a las que es expuesto. Dicha envolvente recibe el nombre de “envolvente de Mohr” (quien plantea la teoría general de la resistencia en 1882) (Figura 02). Como significado físico de la envolvente se plantean los siguientes puntos:

El suelo será estable para un estado de esfuerzos donde el círculo de Mohr quede totalmente por debajo de la envolvente, la resistencia máxima del suelo será alcanzada en un plano donde el círculo de Mohr sea tangente a la envolvente. Este plano crítico forma un ángulo  $\theta_{cr}$  con el plano sobre el cual actúa el esfuerzo principal  $\sigma_1$ , donde  $\theta_{cr} = \pi/4 + \phi/2 = 45^\circ + \phi/2$ , en un suelo no puede generarse un estado de esfuerzos tal que el círculo de Mohr corte a la envolvente, ya que esto implica la falla. Lambe & Whitman (1972).

De la ley de Mohr-Coulomb se desprende que la resistencia al corte de suelos en términos generales tiene dos componentes:

Resistencia por Fricción ( $\tan\phi$ ): se debe al roce entre partículas cuando están sometidas a esfuerzos normales.

Resistencia por Cohesión ( $c$ ): se debe a fuerzas internas físico-químicas que mantienen unidas a las partículas en una masa.

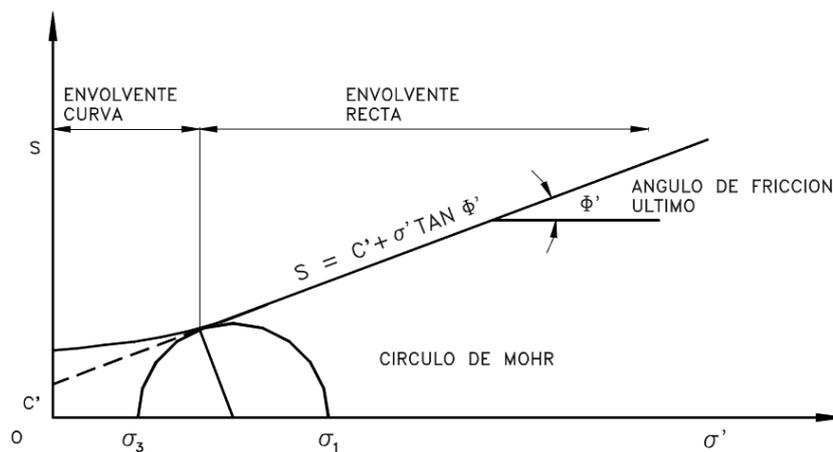


Figura 2. Envolvente de falla, criterio de Mohr – Coulomb. (Lambe & Whitman 1972).

Los suelos no cohesivos como la grava, arena, y limos no plásticos se asumen sin cohesión, y ensayos de laboratorio lo confirman. Casos de suelos típicos que merecen ser mencionados corresponden a los suelos no cohesivos saturados, arcillas normalmente consolidadas y limos arcillosos. El valor de  $\phi$  para suelos no cohesivos saturados varía generalmente entre  $27^\circ$  y  $45^\circ$  grados, dependiendo por ejemplo del aumento de la densidad relativa, de la granulometría y de la forma de las partículas (Wu, 1996). El valor de este parámetro en un suelo bien gradado puede ser varios grados mayor que la de un suelo uniforme del mismo tamaño y forma de partículas. Lo mismo se puede decir para un suelo compuesto por partículas angulares en comparación con un suelo de partículas redondeadas. La distribución de estas tensiones en una talud se asocia al tipo de movimiento que experimenta ésta a lo largo de la superficie de cizalle. La Figura 03 muestra las diferentes condiciones de stress a las que es sometido un elemento de roca y/o suelo en un talud.

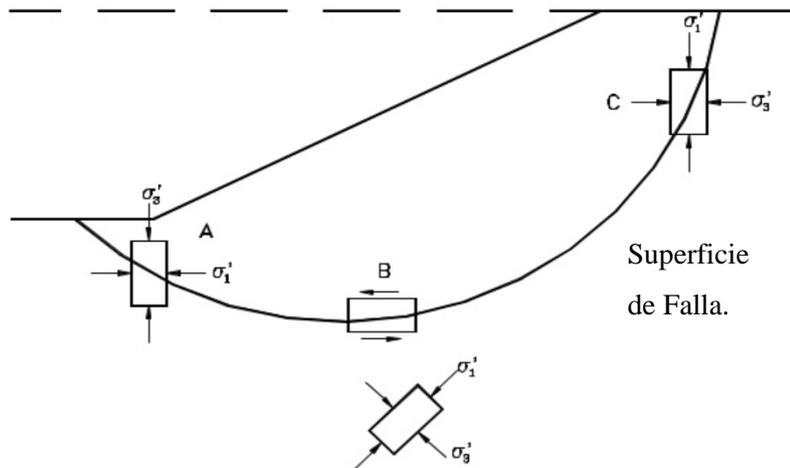


Figura 3. Dirección de esfuerzos principales en la falla de un talud. (Lambe & Whitman 1972).

El efecto de la humedad sobre este valor es solamente de uno o dos grados (Lambe y Whitman, 1972), sin embargo, puede influir fuertemente sobre valores de cohesión otorgándole al suelo una cohesión que podría llamarse “aparente”, sobre todo si el suelo se encuentra en condiciones de humedad óptima, donde éste alcanza su densidad seca máxima.

#### 2.2.4. Análisis de taludes

Los diseños de taludes es uno de los aspectos más importantes de la Ingeniería Geológica, está presente en la mayoría de las actividades constructivas o extractivas. Los podemos clasificar en taludes permanentes para la construcción de infraestructura o fines de edificación se diseñan para ser estables a largo plazo, precisando medidas de estabilización complementarias cuando no sea posible realizar excavaciones con las alturas y ángulos requeridos. Presentando muchas veces sobrecargas estáticas y cargas dinámicas que se ejercen sobre los taludes modificando la distribución de las fuerzas y generan condiciones de inestabilidad. Entre las primeras están el peso estructural o edificios, u otro tipo de cargas como rellenos escombreras, pasó de vehículos pesados, etc. Las cargas dinámicas se deben principalmente a los movimientos sísmicos, naturales o inducidos y las vibraciones producidas por la voladura cercana al talud.

### 2.2.4.1. Rotura en suelos

Las roturas de taludes en suelos se generan a favor de un único plano paralelo a talud son prácticamente inexistentes, aunque este modelo puede ser válido en el caso de laderas naturales con recubrimientos de suelos sobre rocas. Rompiéndose generalmente a favor de las superficies curvas, como forma diversa condicionada por la morfología y estratigrafía del talud. Puede ser aproximadamente circular (la más frecuente), con su extremo interior en el pie del talud, (deslizamiento de pie), cuando este está formando por terreno homogéneo o por varios estratos de propiedades geotécnicas homogéneas.

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

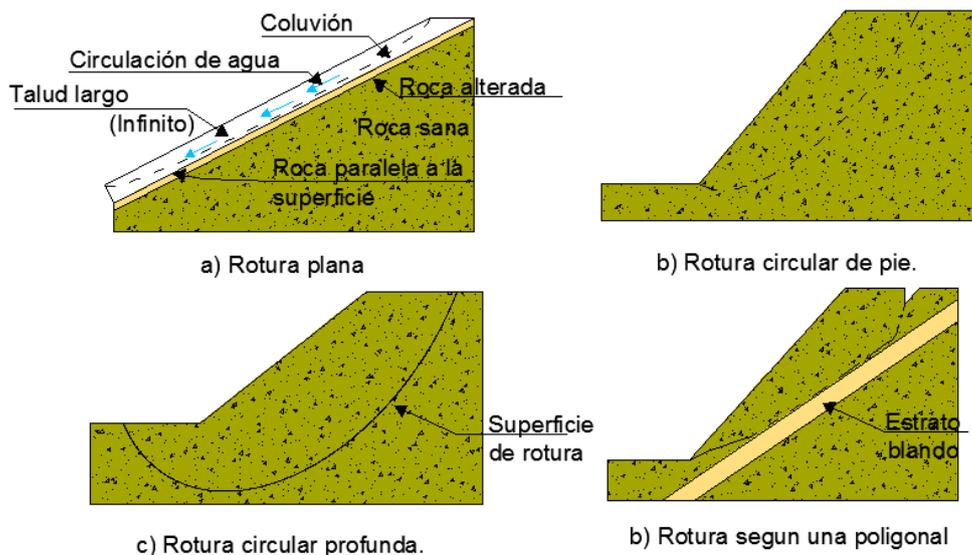


Figura 4. Tipos de superficies de rotura en suelos. (Gonzales de Vallejo 2002).

### 2.2.4.2. Roturas en rocas

Los diferentes tipos de roturas están condicionados por el grado de fracturación del macizo rocoso y por la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto al talud, quedando la estabilidad definida por los parámetros resistentes de las discontinuidades y de la matriz rocosa. Como se presentan en los macizos duros o resistentes, las discontinuidades determinan la situación de los planos de rotura. Presentándose los modelos de rotura más frecuentes son: rotura plana, en cuña.

### 2.2.4.2.1 Rotura Planar.

Se entiende por rotura planar, como aquella en el que el deslizamiento se produce a través de una única superficie plana. Siendo la más sencilla de las formas de rotura posibles se produce cuando existe una fracturación dominante en la roca y convenientemente orientada respecto al talud. La representación semiesférica en la red de Schmidt de esta condición se observa en la figura 08, se prevé el deslizamiento cuando el rumbo de la familia de discontinuidades es similar al del talud y su buzamiento menor que este.

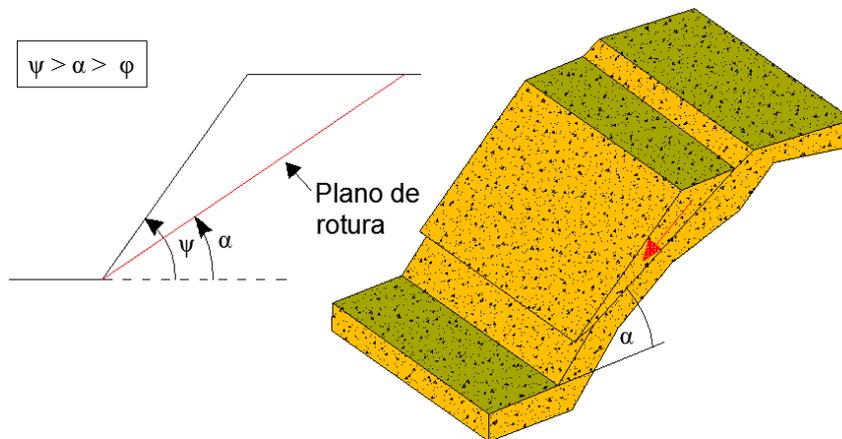


Figura 5. Condiciones para la rotura plana. (Gonzales de Vallejo 2002).

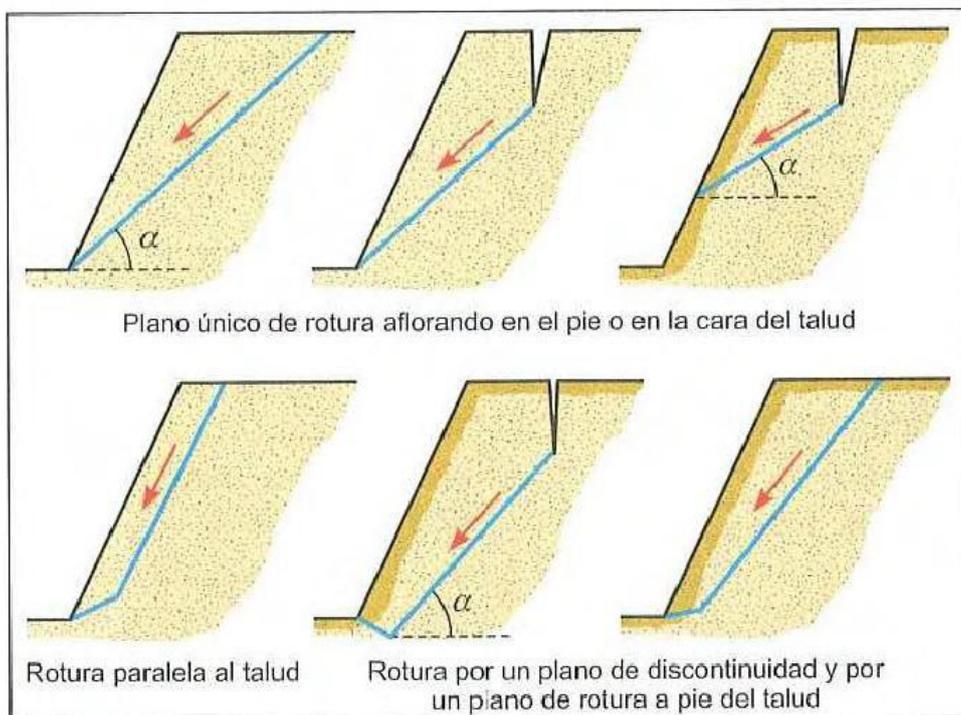


Figura 6. Tipos de rotura plana. (Gonzales de Vallejo 2002).

### 2.2.4.2.2 Rotura en cuña

Corresponde al deslizamiento de un bloque en forma de cuña, formado por dos planos de discontinuidad, a favor de su línea de intersección. Para que se produzca este tipo de rotura, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud, y deben cumplir iguales condiciones que para la rotura plana, siendo el buzamiento la línea de intersección; suele presentarse en macizos con varias familias de discontinuidades, cuya orientación, espaciado y continuidad determinan la forma y volumen de la cuña

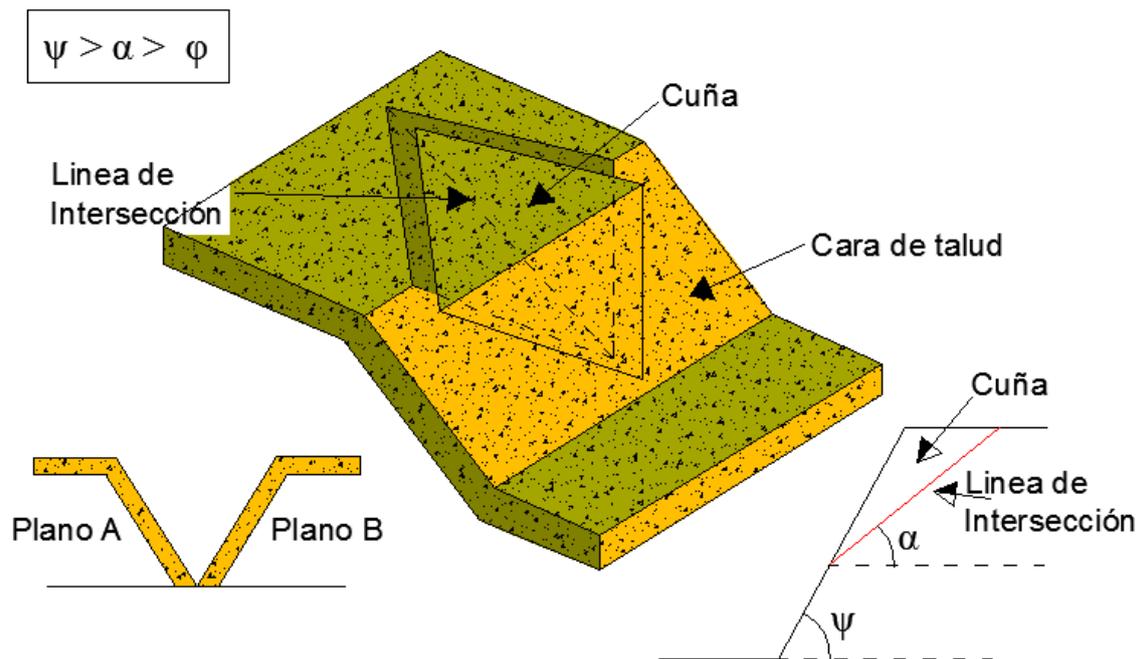


Figura 7. Condiciones para la rotura en cuña. (Gonzales de Vallejo 2002).

### 2.2.5. Geodinámica

Las teorías afines a la investigación de remoción en masa son procesos de transporte de material definidos como procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores. Hauser (1993). Estos movimientos tienen carácter descendente ya que están fundamentalmente controlados por la gravedad. (Cruden 1991).

#### 2.2.5.1. Caída

Es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera. Una vez desprendido el material cae desplomándose

principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento de masas rocosas. Varnes (1978). Durante la caída, los materiales podrán adquirir una alta energía cinética, permitiéndoles abarcar una amplia área a los pies de la ladera, lo cual se acrecentaría si se suma una cantidad importante de material aportado. Bajo estas condiciones, se requiere una evaluación de la geometría de la ladera y de las características específicas de las caídas de roca.

Su propagación con pendientes superiores a los  $76^\circ$  se produce preferentemente por caída libre, por debajo de estos ángulos menores a  $45^\circ$  la propagación se realiza por rodadura. Coraminas (2007). El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido, es decir con velocidades mayores a  $5 \times 10^1$  m/s. Cruden y Varnes (1996). Datos históricos han demostrado que las velocidades alcanzadas por las caídas de rocas pueden exceder los 100 m/s.

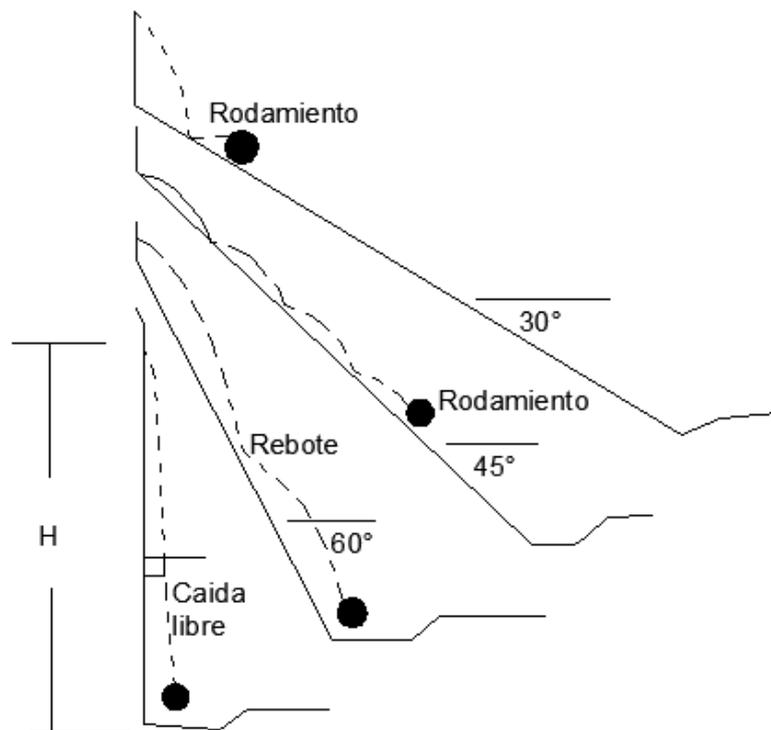


Figura 8. Formas de movimiento para caídas de rocas. (Hoek 2000).

### 2.2.5.2. Deslizamiento

Son movimientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. Este movimiento no ocurre a lo largo de toda la

superficie de ruptura simultáneamente, sino más bien comienza en zonas donde se generan fallas locales, a menudo evidenciadas por grietas de tensión en la superficie original a lo largo de la cual se formará el escarpe principal del deslizamiento.

El inicio de estos desplazamientos se produce cuando el esfuerzo de cizalle supera el valor del esfuerzo normal y la resistencia del suelo en dicha superficie. Cuanto mayor sea la pendiente mayor es la componente de cizalle y los deslizamientos serán más frecuentes. Hauser (1993). Los movimientos pueden involucrar una masa individual desplazada a lo largo de una única superficie de ruptura o bien dos o más masas desplazadas a lo largo de más de una superficie, en tales casos el movimiento es catalogado como simple o múltiple respectivamente; y si un movimiento múltiple ocurre durante un periodo de tiempo se denominará movimiento sucesivo. (Hutchinson 1968).

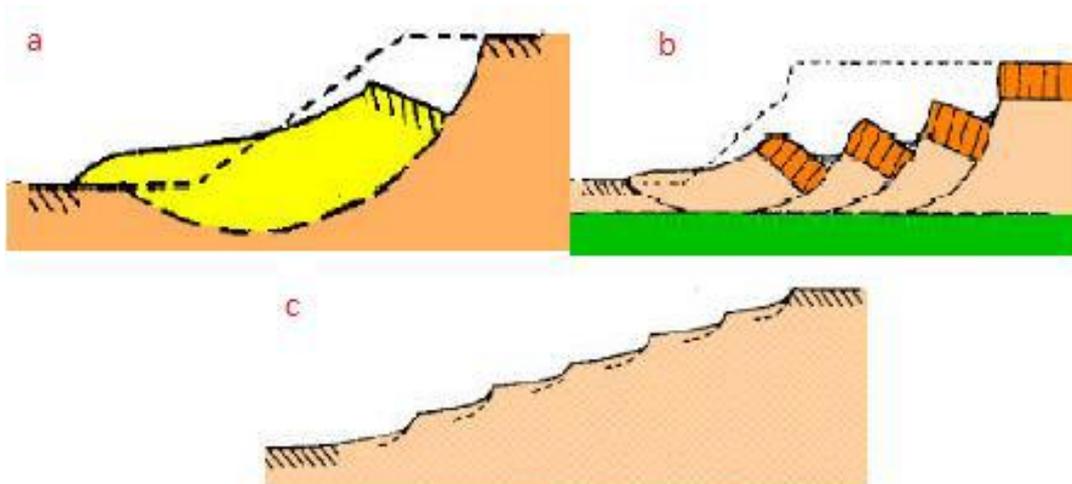


Figura 9. a) Movimiento simple, b) Movimiento múltiple, c) Movimiento sucesivo. (Hutchinson 1968).

Los deslizamientos, por otro lado, pueden clasificarse según la superficie de ruptura generada, lo cual está directamente condicionado por el tipo de material involucrado en el movimiento. En esta categoría se encuentran los deslizamientos rotacionales y los deslizamientos traslacionales, que son descritos a continuación. La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento, por lo que las superficies curvas, cóncavas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales; las superficies de ruptura semiplanas u onduladas a los deslizamientos traslacionales y las superficies planas a los deslizamientos planos. Los deslizamientos planos se clasifican en deslizamientos de rocas, deslizamiento de derrubios y las coladas de barro. (Coraminas 2007).

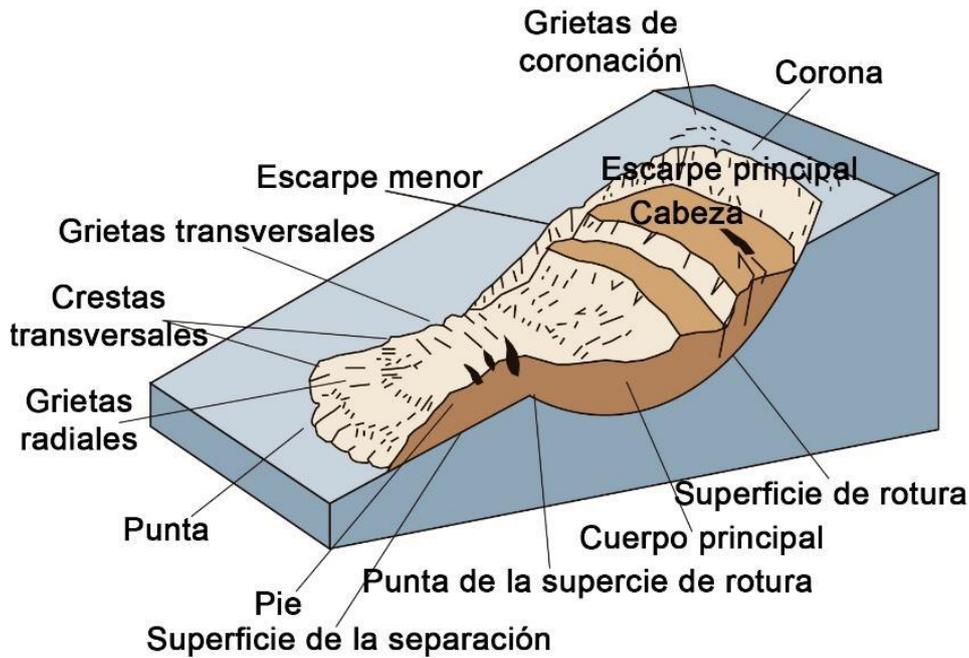


Figura 10. Nomenclatura de las partes de un deslizamiento. (Highland & Jhonson, 2004).

Entre las partes de un deslizamiento es posible identificar la corona, el escarpe principal, el escarpe menor, tope, punta de la superficie de ruptura, cuerpo principal, flanco, pie, dedo y extremo (Varnes, 1978).

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

**Talud.** 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 (Braja, 1984).

**Macizo rocoso.** Masa rocosa afectada por discontinuidades o superficies de debilidad. (González de Vallejo 2002).

**Suelo.** Cobertura superficial de la corteza terrestre producto de la alteración de los minerales de las rocas pre-existentes. La formación del suelo implica la meteorización química de los minerales primarios dando lugar a nuevos minerales. (Dávila 2011).

**Litología.** Es la parte de la geología que trata de las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas. (Suárez 2007).

**Diaclasas.** Fractura o juntura que aparece en el cuerpo de una roca ocasionalmente producida por los esfuerzos tectónicos, presentando direcciones definidas a las cuales se

les denomina sistemas de diaclasas. Las diaclasas tienen especial importancia en el modelado terrestre dado que facilita la erosión. (Dávila 2011).

**Falla.** Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro colindante a éste o de ambos bloques, a través de un plano denominado "plano de falla". Las fallas son producto de esfuerzos tectónicos, producto de la epirogenesis, orogenia, diastrofismo, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de parte de la corteza. Una falla ocasiona discontinuidad de las estructuras geológicas. Los esfuerzos pueden ser: tensionales, compresionales, verticales (en ambos sentidos) o inclinados, dando lugar a diversos tipos de fallas. Los elementos de una falla son: plano de falla, bloque superior o techo, bloque inferior o piso, desplazamiento de la falla o rechazo, espejo de falla, etc. El estudio de las fallas es de suma importancia para la definición de la geología estructural o de la tectónica de una región. (Dávila 2011).

**Deslizamiento.** Deslizamiento de masas rocosas o de suelo por la pérdida de estabilidad, que puede ser por saturación de agua, presencia de materiales arcillosos que actúan como lubricantes, fuertes inclinaciones de las vertientes u otras causas. La acción humana puede muchas veces acelerar el proceso de deslizamiento, por la utilización sin el estudio debido, de las áreas de posibles deslizamientos. (Dávila 2011)

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

El tramo km.142+000 - km.150+000 de la carretera Cajamarca-Ciudad de Dios, se encuentra ubicado al suroeste de la ciudad de Cajamarca, en el Distritos de San Juan.

#### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.

El tramo de carretera comprende los cuadrángulos de Cajamarca y San Marcos; con coordenadas UTM: DATUM WGS84, ZONA – 17S

Tabla 6. Coordenadas del límite de estudio.

Vértices	Longitud	Latitud
Punto Inicial (km.142+000)	776328	9193111
Punto Final (km.150+000)	774981	9196582

Políticamente se encuentra ubicado en:

Tabla 7. Ubicación Política.

Departamento y Provincia	Cajamarca
Distrito	San Juan

#### 3.2. ACCESIBILIDAD.

El acceso al área de estudio inicia en la Plaza de Cajamarca de donde nos dirigimos a la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios; donde seguimos por la misma en dirección SO hasta llegar al Km 150+000 de esta carretera.

Tabla 8. Ruta de acceso a la zona de estudio.

Desde	Hacia	Estado	Distancia	Tiempo en automóvil
Plaza mayor de Cajamarca	km.150+000	Asfaltada	27km	44min

### 3.3. CLIMA

El área de estudio tiene un clima de templado a frío, las temperaturas promedio mínima, media y máximas no varían mucho durante el año, la temperatura mínima varía entre 3 y 8°C en las partes más altas; mientras que las temperaturas máximas fluctúan entre 21 y 22°C en el valle de la Cajamarca y su temperatura media fluctúa 13 y 14°C.

Tabla 9. Estación Weberbauer.

	EN E	FEB	MAR	AB R	MAY	JUN	JUL	AG O	SET	OC T	NO V	DI C
Precipitación (mm)	89	102	126	93	37	13	6	8	34	76	58	78
Evapotrans pot (mm)	128	106	107	94	95	93	105	117	127	131	137	135
Días con lluvia	13	17	17	14	9	4	2	2	9	9	8	11
Temp. Máx. (°)	22	21	21	21	22	22	22	22	22	22	22	22
Temp. Mín. (°)	8	7	7	7	5	3	3	4	5	7	6	6
Temp. Med. (°)	14	14	14	14	14	13	13	14	14	14	14	14
Hum. Rel. Med. (%)	71	75	77	78	73	68	62	58	54	68	64	67
Rad. Global (m/m <sup>2</sup> )	17.3	17.4	17.4	15.8	14.4	14.9	16.5	16.9	16.8	18.1	19.9	18.3
H. de sol (n/n) (%)	37	36	33	38	48	50	56	50	40	41	49	43
V. Del viento (m/s)	15	15	15	15	15	26	31	31	26	21	15	15

Fuente: Estación Weberbauer, 7° 7'S, 78° 27'W, 2621 m.s.n.m. (2011).

### 3.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.4.1. Tipo y Método de investigación

**3.4.1.1 Tipo.** El problema investigado tiene características descriptivas, comparativas y explicativas.

**3.4.1.2. Método de investigación.** Los métodos de investigación serán: Descriptivo, analítico, comparativo y explicativo.

**3.4.2. Población de estudio.** Todos los taludes de la carretera en el tramo km.142+000 – km. 150+000.

**3.4.3. Muestra.** Los taludes con mayor inestabilidad en el área de estudios.

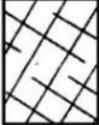
**3.4.4. Unidad de análisis.** Se analizó la estabilidad de los taludes utilizando los métodos de clasificación de los macizos rocosos como: (RQD), (RMR), (GSI) y (SMR).

#### **3.4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

##### **3.4.5.1 Técnicas**

La recolección de datos se realizará usando una técnica de análisis documental y observación, fichas geotécnicas para datos obtenidos en campo.

Tabla 10. Estimación del índice GSI en base a descripciones geológicas.

<p><b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</b></p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p><b>SURFACE CONDITIONS</b></p> <p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p>POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p>VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p> <p>DECREASING SURFACE QUALITY →</p>				
<p><b>STRUCTURE</b></p>						
	<p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90	80	70	60	N/A
	<p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70	60	50	40
	<p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>	70	60	50	40	30
	<p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>	60	50	40	30	20
	<p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>	50	40	30	20	10
	<p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A	N/A	N/A	10

Fuente: (Hoek y Brown 1997)

### **3.4.5.2. Instrumentos**

GPS Navegatorio: Instrumento utilizado para la obtención de las coordenadas para la ubicación de puntos.

Picota Geológica: Herramienta necesaria para extraer muestras de roca.

Brújula Brunton: Utilizado para la toma de datos de direcciones de discontinuidades y planos de estratificación.

Martillo de Esmitd: Instrumento utilizado para probar la resistencia de la roca en campo.

Wincha de 50m: Herramienta necesaria para extraer las medidas les talud.

Libreta de campo: Utilizado para la toma de datos y anotaciones en campo.

Cámara Fotográfica Digital: Instrumento utilizado para el registro fotográfico.

Laptop Toshiba: Instrumento utilizado para el procesamiento de los datos y redacción de los informes.

### **3.4.6 Análisis e interpretación de datos**

Los datos obtenidos en campo de los diferentes tramos expuestos a deslizamientos en la zona de estudio, serán transferidos a una base de datos, para luego ser procesados en los programas: Slide, Rock Data, Dips y ArcGIS. Lográndose el análisis de los datos para obtener los planos que demuestren el comportamiento de los taludes.

Los resultados tuvieron la consistencia y valides necesaria, debido a que las técnicas y análisis de datos fueron verificados adecuadamente, para que los planos temáticos, cuadros y gráficos muestren la realidad de la información de los taludes en la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios el tramo km.142+000 - km.150+000.

## **3.5. PROCEDIMIENTO**

### **3.5.1. Etapa de gabinete**

Esta etapa se conforma en dos fases: la primera, antes de comenzar el trabajo, conformada por una planificación de tareas a realizar anexado a una recopilación de información como la digitalización de la topografía del área de estudio, análisis de imágenes satelitales para un mejor entendimiento de estructuras geológicas, litologías, geoformas y puntos de

control de la investigación. La segunda fase lo conforma campañas de campo constituyendo un análisis e interpretaciones de los datos obtenidos en campo.

### **3.5.2. Etapa de campo**

Se realizó el cartografiado geológico, de estructuras geológicas como fracturamiento de los macizos rocosos, encontrándose fallas y diaclasamiento, pliegues como sinclinales, también se realizó la caracterización geomecánica y geotécnico de los taludes con evidencia de inestabilidad de la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios el tramo km.142+000 - km.150+000, logrando un análisis comparativo y descriptivo, permitiendo definir las zonas críticas mediante puntos de control a través de todo el tramo.

### **3.5.2. Etapa final**

Con la información obtenida en las etapas anteriores, se procesó e interpreto luego se utilizó software`s como: SAS. Planet. Release, ArcGis 10.6, Slide V6, AutoCAD 2014, Global Mapper 16, DIPs, Rock Lab; con los cuales se logró obtener los mapas temáticos y finales.

## **3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS**

En campo se recopiló la información de los macizos rocosos, en un registro geológico-geotécnico, el cual comprende datos para la georeferenciación de la zona crítica, caracterización del macizo rocoso, según el método de Bieniawski, (1989) y de las familias de fracturas. Adicionalmente en la libreta de campo se recogió medidas angulares y lineales del talud para su simulación en el software geotécnico.

Para la geología estructural del área de estudio, inicialmente se analizó en gabinete imágenes satelitales para luego identificarlas en campo, estructuras como fallas y pliegues.

Mediante el programa informático Autocad, se elaboró el modelo digital del tramo de carretera. Mediante el programa RocLab, se caracterizó los macizos rocosos. Mediante el programa Slide, se realizó una simulación por computadora del comportamiento geotécnico de los taludes con problemas de estabilidad, ingresando los datos de campo, con el propósito de calcular un Factor de Seguridad representativo. Mediante el programa

Dips, se realizó el análisis de la matriz rocosa con el propósito de identificar la dirección del posible deslizamiento de los bloques de roca. Generándose de esta manera los resultados de la investigación y cada uno de los mapas temáticos.

### **3.7. GEOLOGÍA LOCAL**

En el área de estudio se pueden apreciar las formaciones geológicas pertenecientes a los grupos Goyllarisquizga (Formación Farrat), Crisnejas (Formaciones Inca, Chúlec y Pariatambo) y Pulluicana (Formaciones Yumagual y Mujarrún)

#### **3.7.1. Grupo Goyllarisquizga**

##### **3.7.1.1. Formación Farrat**

Se ubican afloramientos de esta formación al norte de la zona de estudio, constituyendo macizos rocosos de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso competente con intercalaciones de limolitas y en algunos casos lutitas.

##### **3.7.1.2. Formación Inca**

Se encuentran afloramientos de esta formación en el centro poblado El Higuero cortes de carretera cerca al deslizamiento sur, está constituida por lutitas ferruginosas intercaladas con algunos niveles de areniscas y limolitas.

#### **3.7.2. Grupo Crisnejas**

##### **3.7.2.1. Formación Chúlec**

Los afloramientos de esta unidad se caracterizan por calizas con abundantes fósiles, tiene un color crema amarillento por alteración.

##### **3.7.2.4. Formación Pariatambo.**

Se ubican afloramientos de esta formación al norte oeste de la zona de estudio, constituyendo una alternancia de lutitas con estratos delgados de calizas bituminosas negruzcas, las calizas presentan nódulos silíceos y un olor fétido característico al fracturarlas.

### **3.7.3. Grupo Pulluicana**

#### **3.7.3.1. Formación Yumagual**

Los afloramientos de esta unidad se presentan tanto en la parte sur de la zona de estudio como en la parte central, caracteriza por una secuencia de calizas y margas gris parduzcas en bancos consistentes más o menos uniformes, intercalados con escasos niveles de lutitas grises.

#### **3.7.3.2. Formación Mujarrún**

Se encuentran afloramientos de esta formación en la parte NW del área de estudio y otra pequeña parte al SE, la presencia de esta formación en las zonas NW y SE en el área de estudio se debe a la presencia de un sinclinal con dirección NW - SE, está constituida por una secuencia de calizas nodulares macizas.

### **3.7.4. Formación Cajamarca**

Los afloramientos de esta unidad coinciden a lo largo del eje de un sinclinal, está constituida por calizas gris oscuras o azuladas, con delgados lechos de lutitas y margas. Las calizas se presentan en bancos gruesos con escasos fósiles.

## **3.8. GEOMORFOLOGÍA.**

### **3.8.1. Unidades Geomorfológicas por Proceso Morfoestructural.**

Se ha tomado en cuenta el proceso principal que ha afectado a estas estructuras, las cuales son los procesos estructurales que han deformado a las rocas sedimentarias de las Formaciones: Pariatambo y Yumagual; observándose los bloques afectados y diferenciándose en campo por sus afloramientos de escarpes rocosos.

#### **3.8.1.1. Montaña.**

Se caracteriza por el amplio terreno que ocupan así mismo por las mayores elevaciones que tiene. Ocupa una pequeña cantidad de área de la zona de estudio, la cual está constituida por las rocas calizas y margas de las Formaciones Pariatambo y Yumagual que se ubican en la parte NW de la zona de estudio. Esta montaña tienen elevaciones desde los 2 550 m.s.n.m., hasta los 3 130 m.s.n.m.

### **3.8.2. Unidades Geomorfológicas por Proceso Denudacional.**

Se ha tomado en cuenta el proceso principal que ha formado estas unidades, las cuales son los procesos exógenos, que han meteorizado y erosionado a las rocas sedimentarias areniscas y calizas de las Formaciones: Cajamarca, Mujarrun, Yumagual, Pariatambo, Chúlec, Inca y Farrat, dando como resultado las características de superficies activas a la erosión y/o sedimentación.

#### **3.8.2.1. Colinas.**

Se caracterizan por el poco espacio de terreno que ocupan, así mismo por las menores elevaciones que tienen., Teniendo una gran presencia al SW del área de estudios, ocupando una parte considerable, sus elevaciones no son mayores a los 150 m., se caracterizan morfológicamente por ser de forma redondeada y sus pendientes son bajas, menor a los 50°.

#### **3.8.2.2. Cárcavas.**

En la zona de estudio encontramos 5 cárcavas con dirección NW – SE los cuales debido a la erosión hidrológica que actúan en la superficie de terrenos débiles dan lugar al arrastre de las partículas del suelo produciendo y/o formando los surcos o socavones en la superficie, producto de la inestabilidad o poca cohesión del terreno. Se caracterizan por presentarse en los depósitos coluviales en la zona de estudio, sus dimensiones son variables, las cuales tienen profundidad desde 50 cm. hasta los 12 m. y ancho desde los 2 m. hasta los 15 m.

#### **3.8.2.3. Ladera Denudacional Activa.**

Se presenta en áreas coluviales a los márgenes de las cárcavas y de la quebrada Los Sapitos ubicada al SE del área de estudio; las cuales están muy meteorizadas, está compuesta por suelo, arcillas y fragmentos de rocas de diferentes tamaños, las pendientes son mayores a los 50°, todos estos factores hacen que sean muy inestables y propensos a la formación de futuros deslizamientos.

### **3.8.3. Unidades Geomorfológicas por Proceso Fluvial.**

Se ha considerado el proceso principal que ha formado estas unidades, las cuales son los procesos Fluviales, que han sido meteorizados, erosionado y depositado en la superficie llana del terreno.

#### **3.8.3.1. Cauces Actuales.**

Vienen a representar las quebradas principales que lo conforman, los cuales son la quebrada Los Sapitos y la quebrada San Juan, se caracterizan por haber sido los principales causantes de la formación de la mayoría de la unidades geomorfológicas debida a este proceso fluvial, en estos cauces se observa sedimentos transportados los cuales son sedimentos no consolidados de areniscas y calizas de diferentes tamaños, los caudales de las quebradas es variable y depende de las épocas de estiaje en las cuales en los meses más lluviosos (enero- marzo) el caudal es mayor y por lo tanto se tiene mayor cantidad de sedimentos transportados y depositados.

#### **3.8.3.2. Valle Coluvial.**

Se ha denominado así al depósito cuaternarios de origen coluvial el cual se localiza en las laderas Sur de la unidad geomorfológica montañosa, al SE de la zona de estudio, este conforman el valle Coluvial que es ondulado y de diversas medidas de pendientes entre los 25° a los 60°, este depósito está conformado por sedimentos angulosos, rocas angulosas y estratificaciones, se observan los diferentes eventos y canales de deslizamiento y depositación de estos sedimentos coluviales.

### **3.8.4. Pendientes.**

#### **3.8.4.1. Llanos (<1°).**

En el área de estudios no encontramos este tipo de pendientes ya que se caracteriza por la presencia de terrazas, abanicos, lomadas suaves y colinas bajas.

#### **3.8.4.2. Inclinaos con suave pendiente (1° a 5°).**

Este tipo de pendiente se encuentran ausentes en el área de estudio ya que no encontramos la presencia de planicies, terrazas altas, pie de montes aluviales ni depósitos glacio-fluviales los cuales son característicos de este tipo de pendiente.

#### **3.8.4.3. Pendiente moderada (5° a 15°).**

Se encuentra presente este tipo de pendiente en el tramo final al SE del área de estudio cerca al pueblo del distrito de San Juan. Está conformada por la presencia de depósitos de vertiente indiferenciados y también por la presencia de piedemontes coluvio-deluviales, los cuales son aprovechados para el cultivo.

#### **3.8.4.4. Pendiente fuerte (15° a 25°).**

La presencia de este tipo de pendiente se da en los extremos del tramo del área de estudio, ya que este tipo de pendiente tiende a caracterizarse por estar presente en las laderas de montañas y en valles tributarios a los ríos principales. Estas áreas también son aprovechadas como zonas de cultivo.

#### **3.8.4.5. Pendiente escarpada (25° a 45°).**

Este tipo de pendiente está presente en la mayor parte del área de estudio y se encuentra sobre las unidades litológicas compuestas por areniscas y calizas los cuales se encuentran fuertemente fracturadas y altamente meteorizadas, Presentando variaciones en su conformación morfológica, debido a los agentes erosivos y los cambios litológicos.

#### **3.8.4.6. Terrenos muy escarpados (>45°).**

Se encuentra presente este tipo de pendiente en el tramo 07 con progresiva Km.145+570 – Km.145+620 del área de estudios, siendo esta una unidad geomorfológica generadora de zonas críticas ya que por su gran pendiente y al ser sometidas a procesos de excavación mecánica entran en estado de desequilibrio.

#### **3.8.5. Red de drenaje y quebradas.**

En el área de estudio encontramos un drenaje de tipo dendrítico el cual es disturbado en presencia de zonas de falla. Las quebradas pertenecientes al área de estudio cruzan la

carretera, como son la quebrada El Higuierón del centro poblado del mismo nombre con dirección NW-SE y la quebrada Loa Sapitos del centro poblado de Hierba Buena con dirección NE-SW. Ambas quebradas cuentan con una geometría en forma de V con fuertes procesos de erosión lateral y de fondo, conformando canales de descarga del tipo angosto pero profundo, con presencia de niveles de agua tanto en tiempo de lluvias así como en estiaje. La geometría del canal de las quebradas es poca sinuosa por su condición juvenil y debido a la variabilidad y temporalidad en la descarga pluvial, denotándose la profundización del cauce a lo largo de toda su longitudinal.

### **3.9. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.**

La carretera Cajamarca – Ciudad de Dios el tramo km.142+000 - km.150+000, se encuentra afectada estructuralmente por fallas con dirección NW-SE, se evidencia que los planos de estratificación de las unidades geológicas identificadas presentan una orientación aproximadamente NW-SE, estas habrían sido afectadas por una importante actividad tectónica evidenciado por la presencia de una serie de estructuras como pliegues y fallas siendo una evidencia de esta actividad tectónica un sinclinal con dirección NW-SE que se encuentra al centro del área de estudio aproximadamente, también se puede observar la presencia de un sistema secundario de lineamientos con orientación NE-SW que coincide en la actualidad con una serie de quebradas, asimismo esta zona está afectada por sobrecargas externas producto del alto tránsito y activación de dichas estructuras generando asentamiento en la carretera.

### **3.10. GEOTECNIA**

El tramo de estudio se ha sectorizado por tramos críticos, dentro de los cuales se analizan y definen el comportamiento geológico - geomecánico, que van en función de las variables identificadas por sus condiciones geotécnicas.

#### **3.10.1. Tramo 01**

El talud de la carretera está compuesto por macizos rocosos de areniscas blanquecinas de grano medio competente con intercalaciones de limolita perteneciente a la Formación Farrat (Ki-f), cuyos planos están ligeramente meteorizados; conformando dos familias de

discontinuidades. Encontramos procesos geodinámicos cuyos resultados son derrumbes de rocas generados por la erosión y meteorización, siendo una zona insegura.



Foto 1. Talud en el tramo 01, Km. 149+670 – Km. 149+720

### 3.10.1.1. Propiedades.

Tabla 11. Propiedades del macizo rocoso del tramo 01.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Unidad Geológica: Ki-f
Clasificación Hoek-Brown	Sigci	MPa	35
	GSI	-	53
	Mi	-	17
	D	-	0.7
	Ei	MPa	9625
	MR	-	275
Criterio Hoek-Brown	Mb	-	1.28505
	S	-	0.00110094
	A	-	0.504656
Rango de envoltura de rotura	Aplicación	-	Taludes
	sig3max	MPa	0.436747
	Peso específico	MN/m3	0.0245
	Peso específico saturado	MN/m3	0.0260
	Altura promedio	M	20
Ajuste Mohr-Coulomb	C	MPa	0.23914
	Phi	Degrees	52.6218
Parámetros del Macizo Rocosó	Sigt	MPa	-0.0299855
	Sigc	MPa	1.12506
	Sigcm	MPa	5.25065
	Erm	MPa	1251.41
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

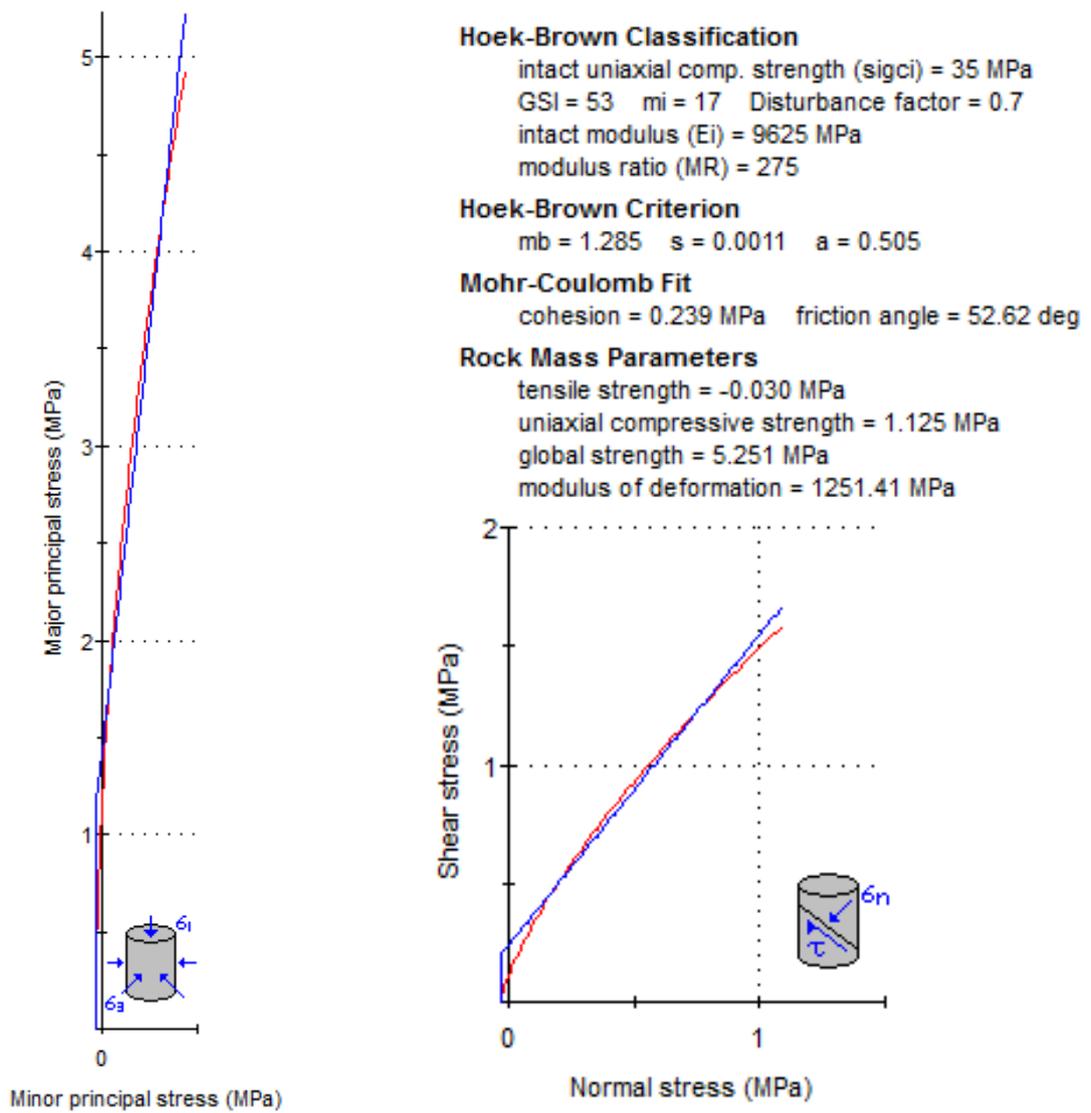


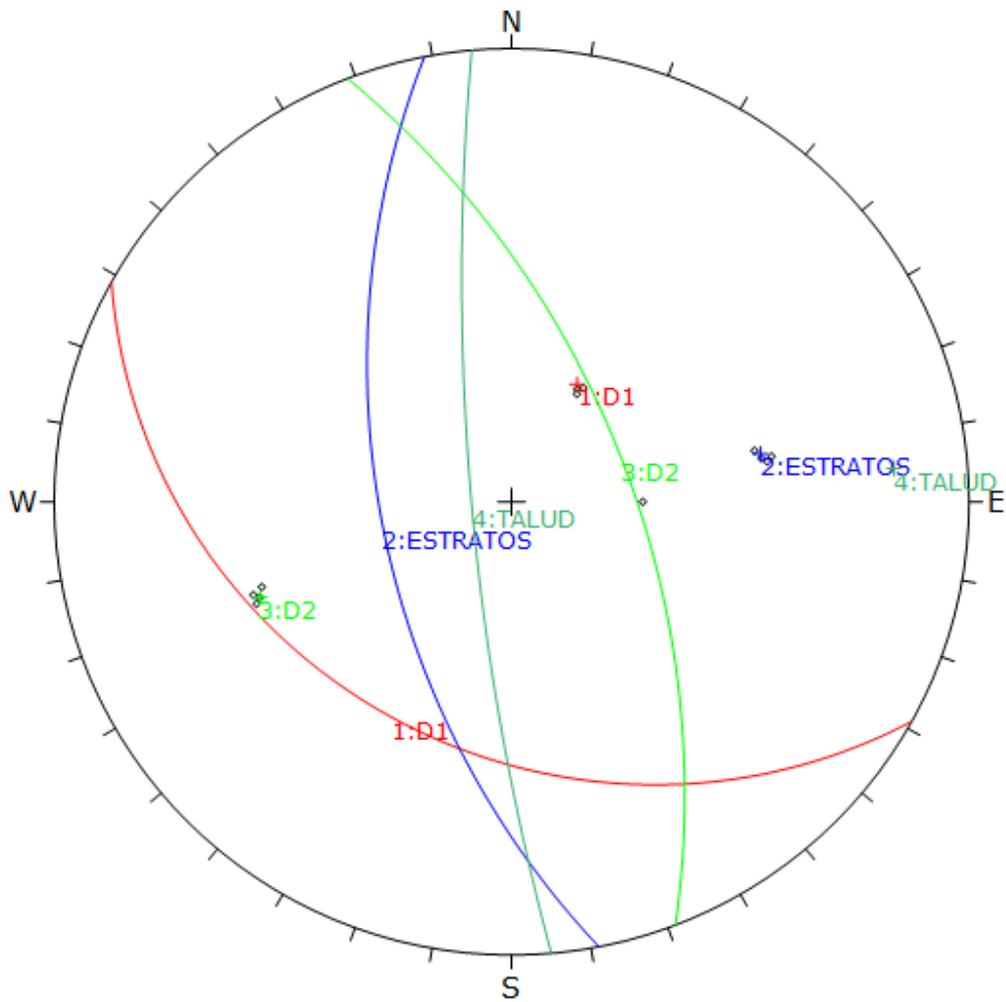
Figura 11. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en la arenisca de la Fm. Farrat.

### 3.10.1.2. Discontinuidades

Tabla 12. Información resumida de discontinuidades de la estación 1.

Estructura	Azimut	Dip	Dip Direction
Estrato	328	170	58
D1	302	120	32
D2	332	340	62
E	329	171	59
D1	303	122	33
D2	331	339	61
E	327	168	57
Talud	175	80	265

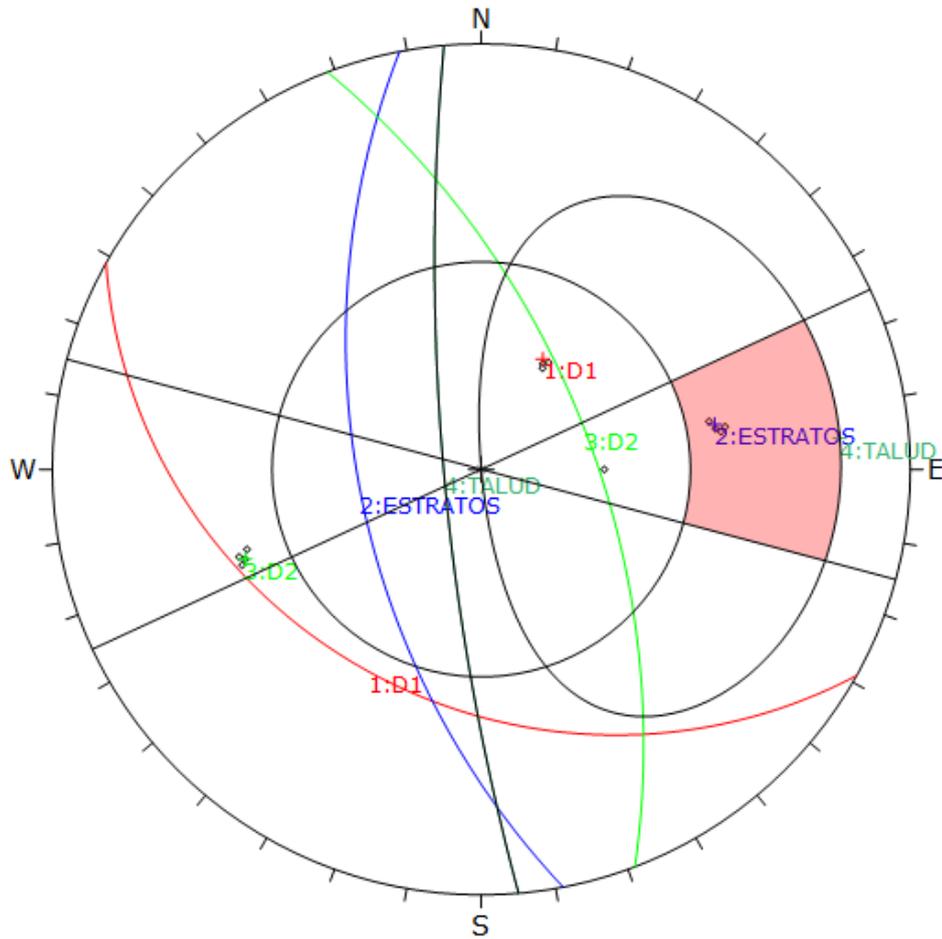
### 3.10.1.3. Planos Mayores



	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		33	209	D1
2		58	259	ESTRATOS
3		61	69	D2
4		80	265	TALUD
<b>Plot Mode</b>		Pole Vectors		
<b>Vector Count</b>		12 (12 Entries)		
<b>Hemisphere</b>		Lower		
<b>Projection</b>		Equal Angle		

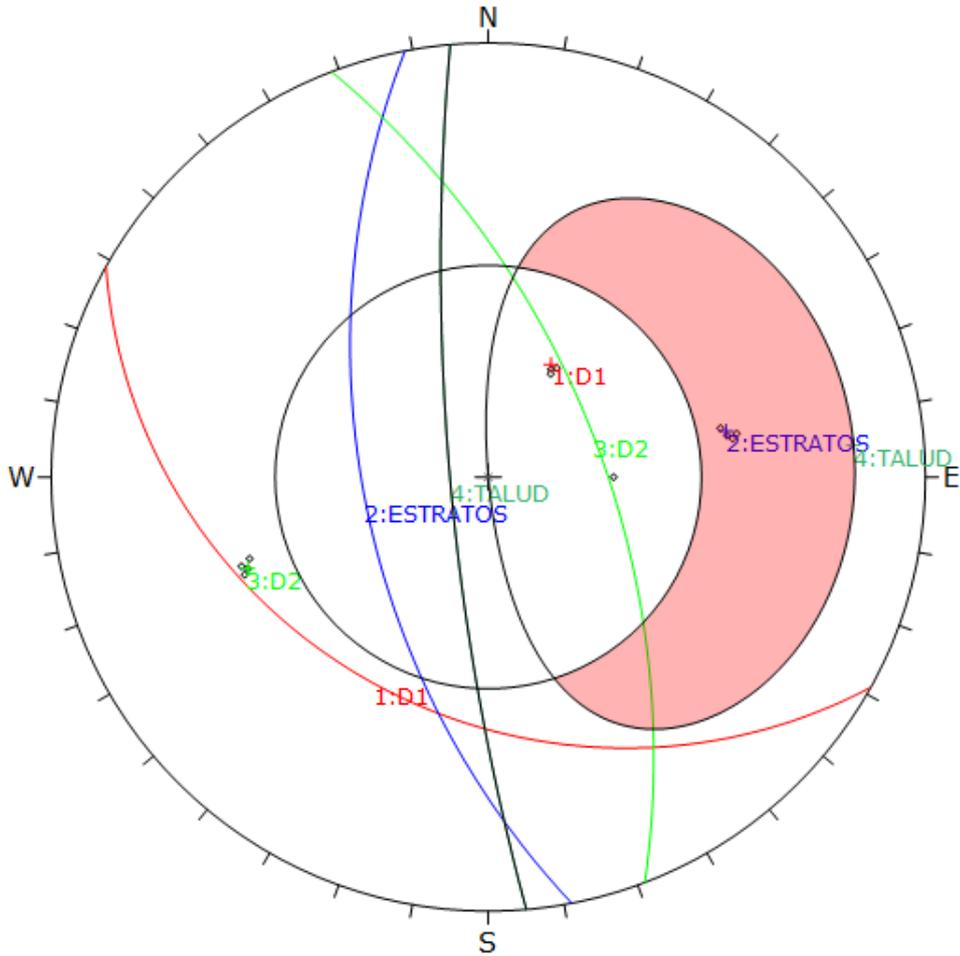
### 3.10.1.4. Análisis Cinemático

#### ✓ Rotura Planar



<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	265		
<b>Friction Angle</b>	52°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Planar Sliding (All)	4	12	33.33%
	<b>Color</b>	<b>Dip</b>	<b>Dip Direction</b>
	<b>User Planes</b>		
1	■	33	209
2	■	58	259
3	■	61	69
4	■	80	265
	<b>Label</b>		
	D1		
	ESTRATOS		
	D2		
	TALUD		
<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors		
<b>Vector Count</b>	12 (12 Entries)		
<b>Hemisphere</b>	Lower		
<b>Projection</b>	Equal Angle		

✓ Rotura Planar Sin Límites

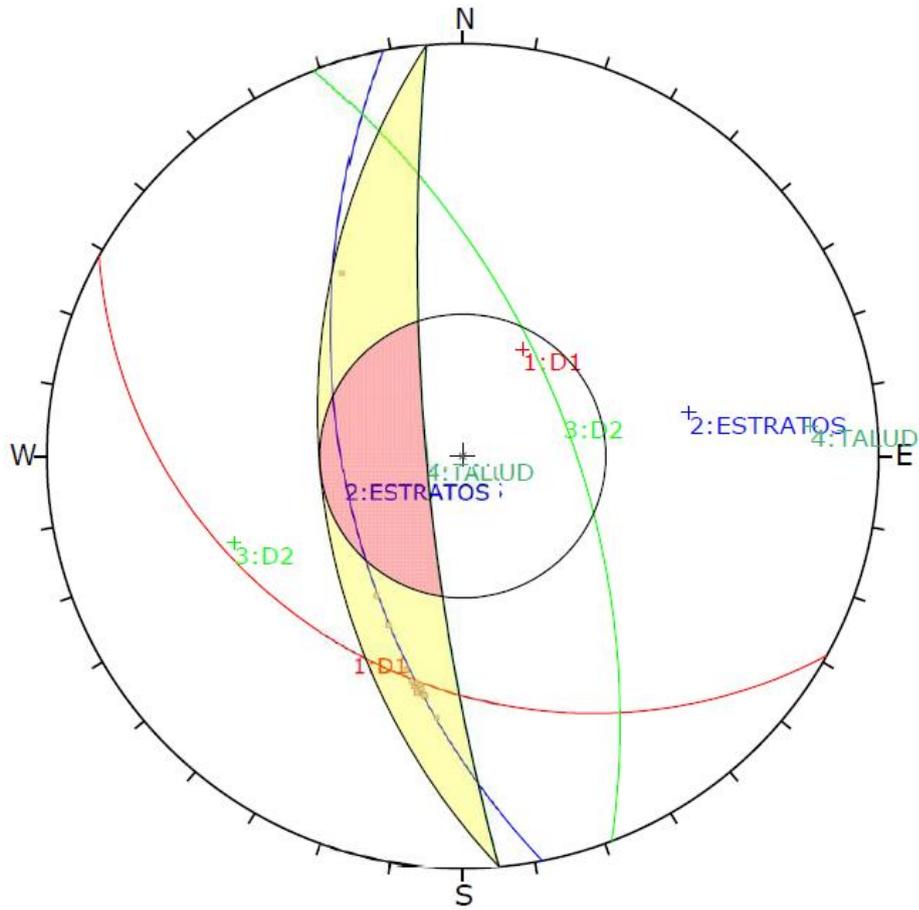


<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	265		
<b>Friction Angle</b>	52°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Planar Sliding (All)	4	12	33.33%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		33	209	D1
2		58	259	ESTRATOS
3		61	69	D2
4		80	265	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	12 (12 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura En Cuña



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

<b>Kinematic Analysis</b>	Wedge Sliding
<b>Slope Dip</b>	80
<b>Slope Dip Direction</b>	265
<b>Friction Angle</b>	52°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	17	66	25.76%

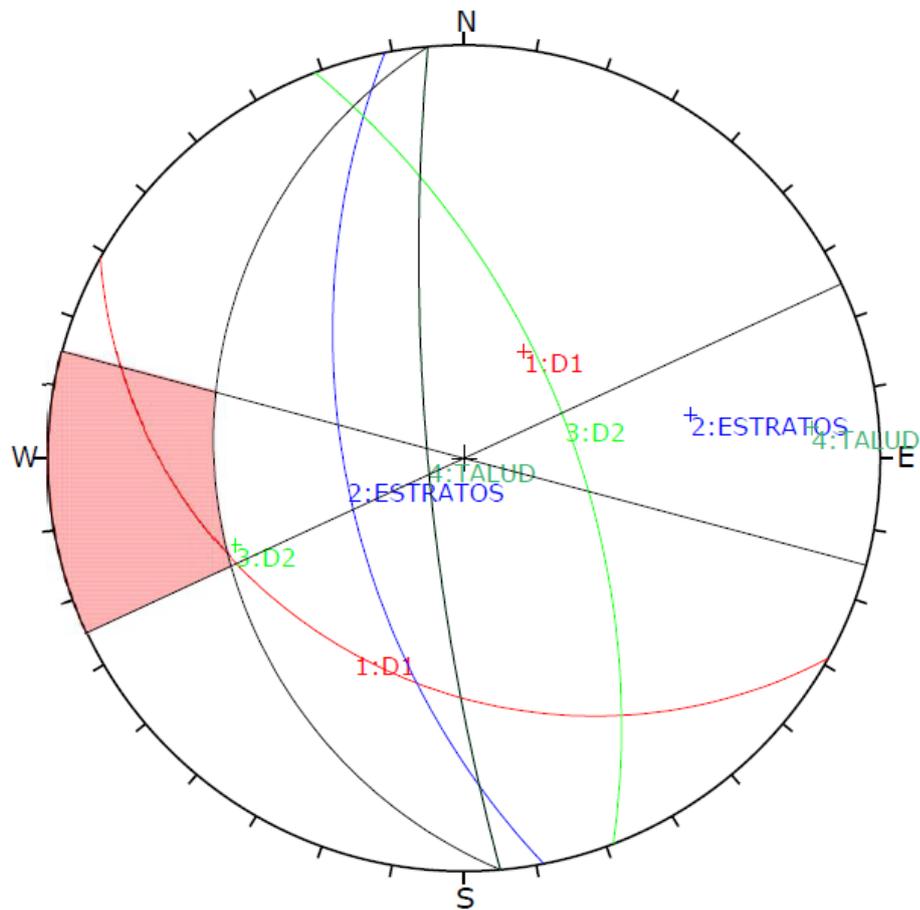
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	33	209	D1
2	■	58	259	ESTRATOS
3	■	61	69	D2
4	■	80	265	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	12 (12 Entries)
<b>Intersection Mode</b>	Grid Data Planes
<b>Intersections Count</b>	66
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura Por Volcamiento

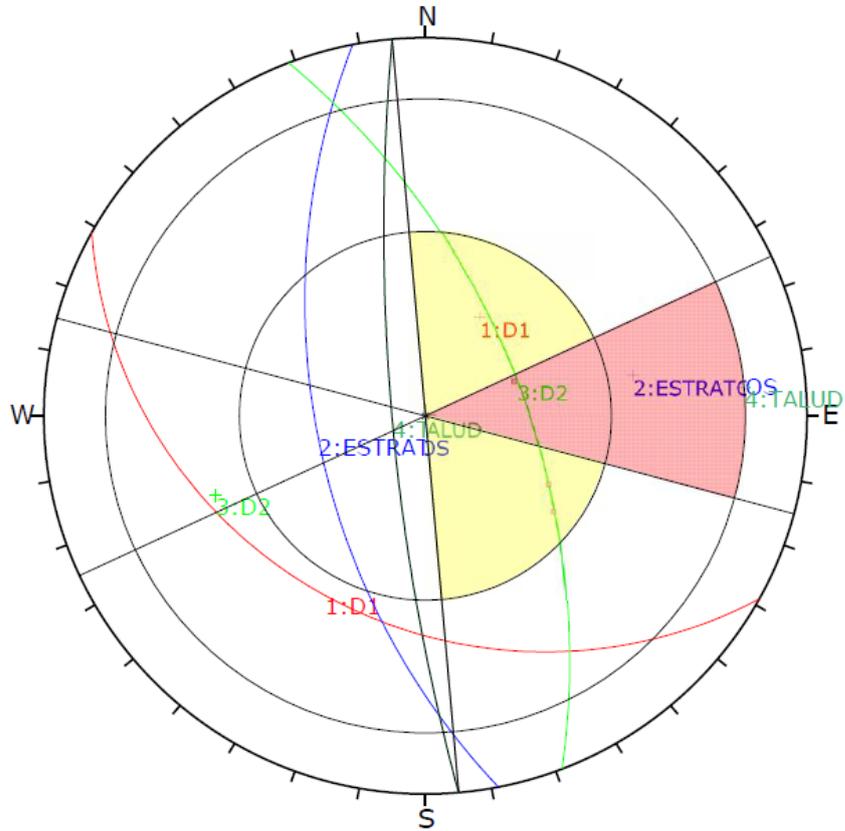


<b>Kinematic Analysis</b>	Flexural Toppling		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	265		
<b>Friction Angle</b>	52°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Flexural Toppling (All)	0	12	0.00%

	<b>Color</b>	<b>Dip</b>	<b>Dip Direction</b>	<b>Label</b>
<b>User Planes</b>				
1		33	209	D1
2		58	259	ESTRATOS
3		61	69	D2
4		80	265	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	12 (12 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura Por Volcamiento Directo



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

<b>Kinematic Analysis</b>	Direct Toppling		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	265		
<b>Friction Angle</b>	52°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Direct Toppling (Intersection)	1	66	1.52%
Oblique Toppling (Intersection)	2	66	3.03%
Base Plane (All)	8	12	66.67%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	33	209	D1
2	■	58	259	ESTRATOS
3	■	61	69	D2
4	■	80	265	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	12 (12 Entries)
<b>Intersection Mode</b>	Grid Data Planes
<b>Intersections Count</b>	66
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

## ✓ Resumen

Tabla 13. Resumen de los resultados del análisis de la estación 1.

Tipo De Rotura	Probabilidad %
Planar	33.33
Planar Sin Límites	33.33
En Cuña	25.76
Por Volcamiento	0
Por Volcamiento Directo	66.67

### 3.10.2. Tramo 02

El talud se encuentra constituido por un Basamento de rocas perteneciente a la Formación Chúlec (Ki-chu), conformando un de Depósito Cuaternario. La base del talud lo conforma depósito coluvial compuesto por calizas con abundantes fósiles, tiene un color crema amarillento por su alteración.

Su geomorfología del talud corresponde a una pendiente de terrenos muy escarpados formado por eventos geomorfológicos de erosión desde la base al tope con una pendiente de 55°, el cual lo vuelve inestable por su composición litológica (fragmentos de calizas con abundantes fósiles).



Foto 2. Talud en el tramo 02, Km. 149+280 – Km.149+330.

### 3.10.2.1. Propiedades.

Tabla 14. Propiedades del macizo rocoso del tramo 02.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Unidad Geológica: Ki-chu
Clasificación Hoek-Brown	Sigci	MPa	35
	GSI	-	55
	Mi	-	9
	D	-	0
	Ei	MPa	31500
	MR	-	900
Criterio Hoek- Brown	Mb	-	1.80414
	S	-	0.00673795
	A	-	0.504048
Rango de envoltura de rotura	Aplicación	-	Taludes
	sig3max	MPa	1.02488
	Peso específico	MN/m3	0.0245
	Peso específico saturado	MN/m3	0.0251
	Altura promedio	M	50
Ajuste Mohr- Coulomb	C	MPa	0.570694
	Phi	Degrees	48.2297
Parámetros del Macizo Rcoso	Sigt	MPa	-0.130715
	Sigc	MPa	2.81541
	Sigcm	MPa	6.49605
	Erm	MPa	12860.8
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

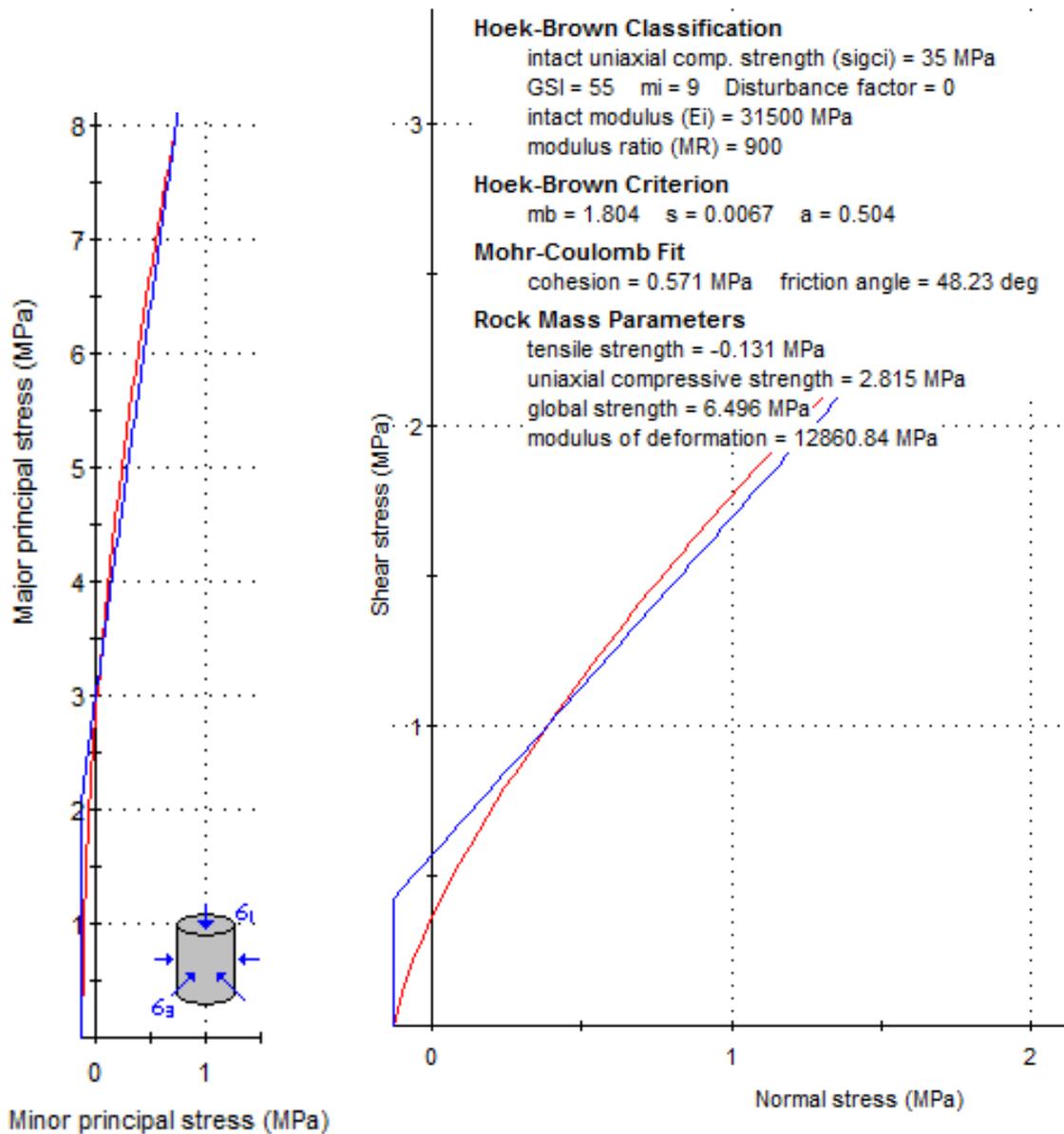


Figura 12: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las Calizas margosas de la Formación Chuléec.

Tabla 15. Propiedades del suelo del tramo 02.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Qh-co
Tipo de Depósito	-	-	Coluvial
Tipo de suelo	SUCS	-	CH-GC
Peso específico	Seco	KN/m <sup>3</sup>	21
	Saturado	KN/m <sup>3</sup>	25
Criterio de Mohr-Coulomb	Cohesión	kPa	12
	Ángulo de fricción	grados	34.5
	Resistencia tensional	kPa	-5
	Resistencia a la compresión uniaxial	kPa	45.6165
	Alpha	grados	74.5275
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

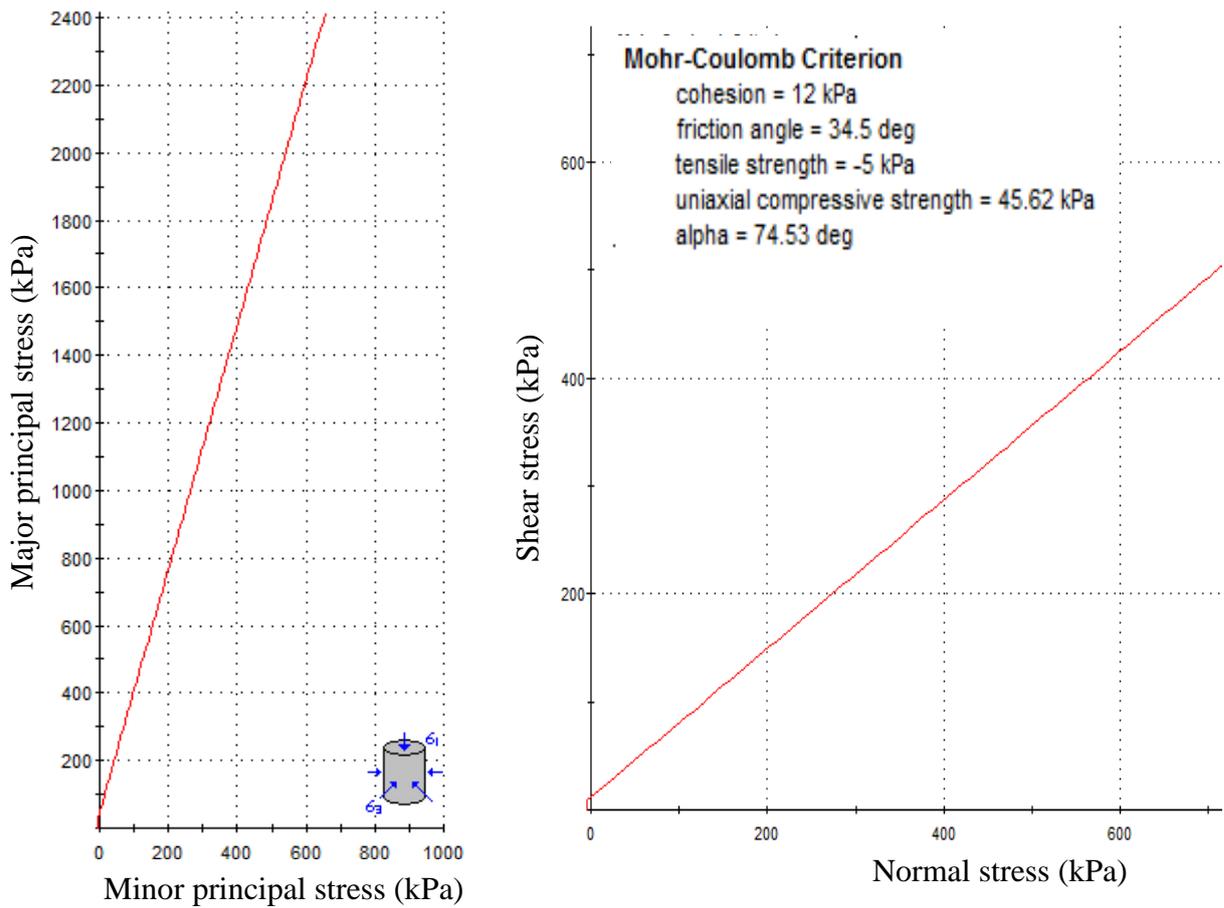


Figura 12. Interpretación en RocData del tramo 02.

### 3.10.3. Tramo 03

EL talud está constituido por rocas de la Formación Yumagual (Ks-yu); la conforman rocas muy fracturadas con diámetros que van desde 0.10 - 0.15 m. conformando un depósito coluvial con una matriz de calizas y margas gris parduzcas y lutitas grises muy deleznales actuando como relleno.

Geomorfológicamente está compuesta por terrazas de composición cuaternaria de gravas gruesas a finos, siguiendo la secuencia de depositación en el talud, teniendo una pendiente de 80°, el cual lo vuelve inestable.



Foto 3. Talud en el tramo 03, Km.148+400 – Km.148+600.

### 3.10.3.1. Propiedades.

Tabla 16. Propiedades del macizo rocoso del tramo 03.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Unidad Geológica	
			Ki-pa	Ks-yu
Clasificación Hoek-Brown	Sigci	MPa	35	75
	GSI	-	45	60
	Mi	-	9	10
	D	-	0.7	0.7
	Ei	MPa	31500	52500
	MR	-	900	700
Criterio Hoek- Brown	Mb	-	0.438343	1.11047
	S	-	0.000345328	0.00303634
	A	-	0.508086	0.502841
Rango de envoltura de rotura	Aplicación	-	Taludes	Taludes
	sig3max	MPa	0.955867	1.07294
	Peso específico	MN/m3	0.0245	0.0245
	Peso específico saturado	MN/m3	0.0261	0.0251
	Altura promedio	M	50	50
Ajuste Mohr- Coulomb	C	MPa	0.262581	0.736872
	Phi	Degrees	37.2787	49.6389
Parámetros del Macizo Rcoso	Sigt	MPa	-0.0275731	-0.205072
	Sigc	MPa	0.609808	4.06523
	Sigem	MPa	2.99387	10.809
	Erm	MPa	2465.14	10535.8
Tipo de material	Mogi	-	Frágil	Dúctil

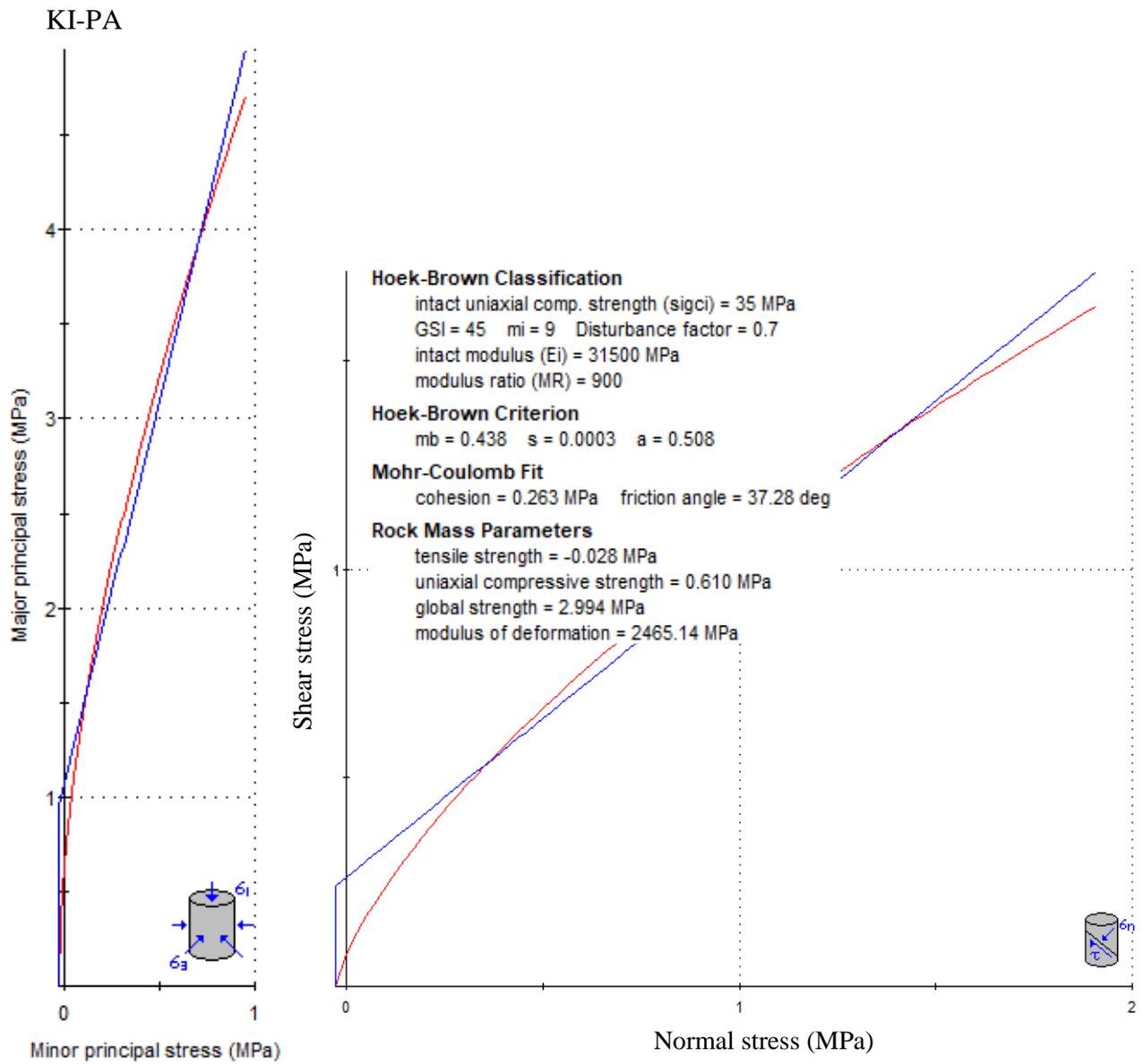


Figura 13. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las Calizas bituminosas de la Formación Pariatambo.

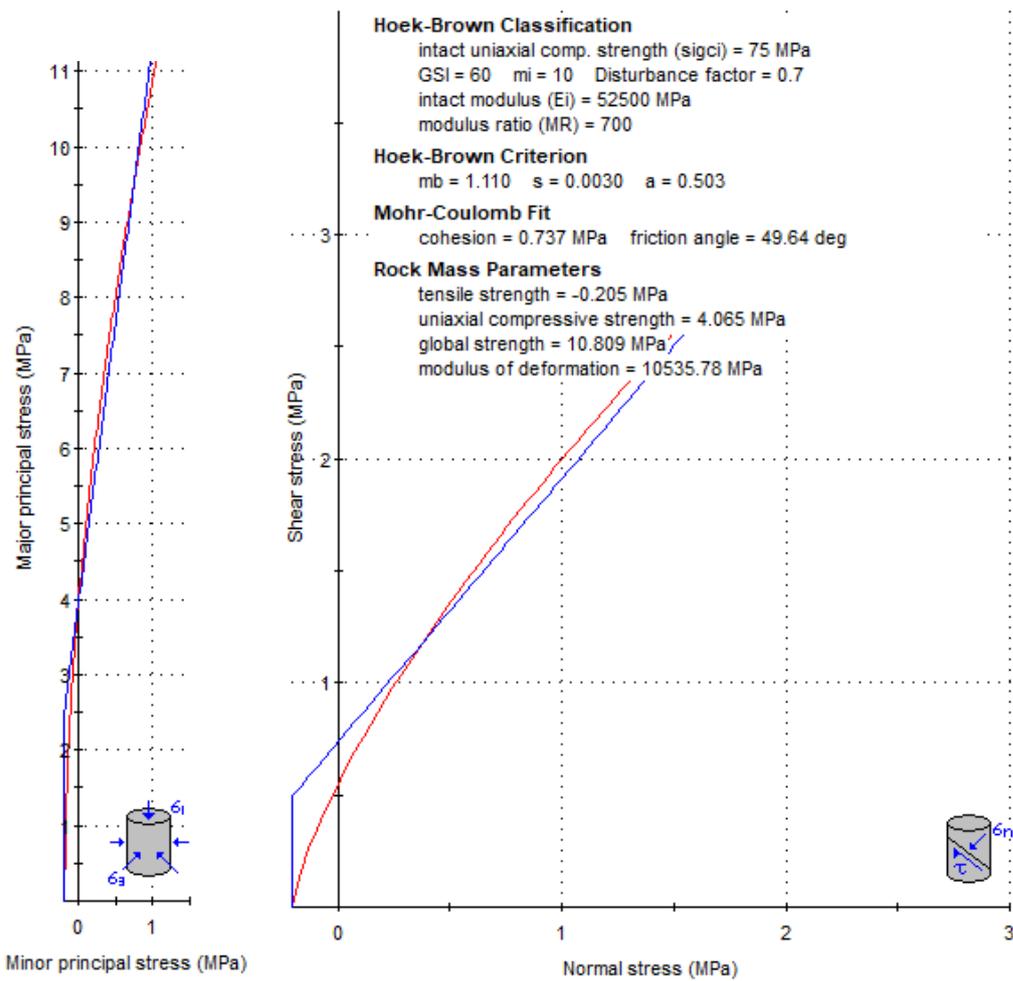


Figura 14. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las margas gris parduzcas de la Formación Yumagual.

Tabla 17. Propiedades del suelo del tramo 03.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Qh-co
Tipo de Depósito	-	-	Coluvial
Tipo de suelo	SUCS	-	CH
Peso específico	Seco	KN/m <sup>3</sup>	20
	Saturado	KN/m <sup>3</sup>	25
Criterio de Mohr-Coulomb	Cohesión	kPa	20
	Ángulo de fricción	grados	38.5
	Resistencia tensional	kPa	-5
	Resistencia a la compresión uniaxial	kPa	82.9286
	Alpha	grados	76.9029
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

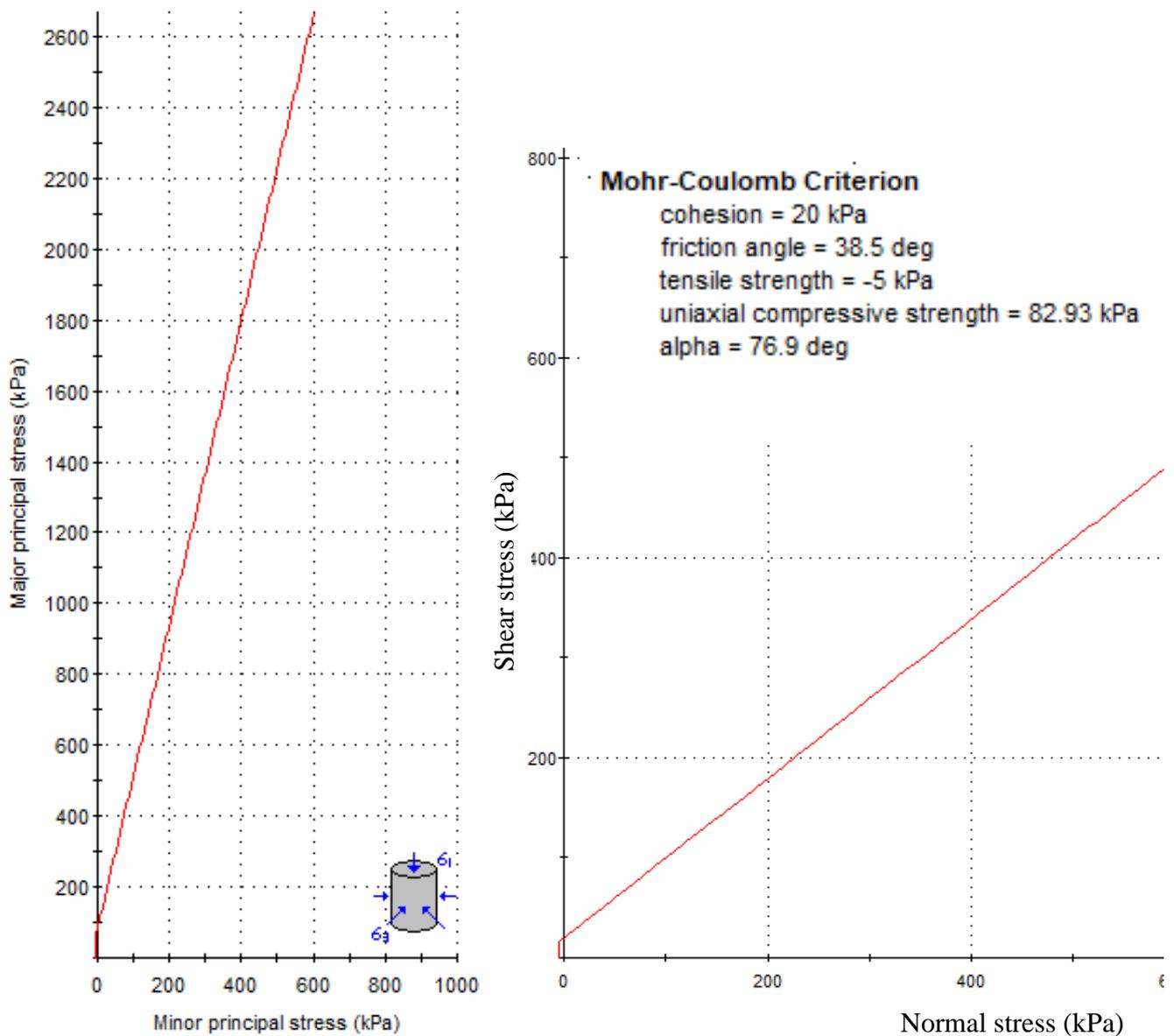


Figura 15. Interpretación en RocData del tramo 03.

### 3.10.4. Tramo 04

Su litología del talud está conformada por rocas de la Formación Yumagual (Ks-yu), caracterizada por una secuencia de calizas y margas gris parduzcas potentes más o menos uniformes. Lo constituyen calizas altamente alteradas formando surcos en la parte frontal del talud por la precipitación, debilitando de manera progresiva y desestabilizando el talud.



Foto 4. Talud en el tramo 04, Km.148+110 – Km.148+160

### 3.10.4.1. Propiedades.

Tabla 18. Propiedades del macizo rocoso del tramo 04.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Unidad Geológica: Ks-yu
Clasificación Hoek-Brown	Sigci	MPa	75
	GSI	-	72
	Mi	-	10
	D	-	0.7
	Ei	MPa	52500
	MR	-	700
Criterio Hoek- Brown	Mb	-	2.14711
	S	-	0.0172841
	A	-	0.50116
Rango de envoltura de rotura	Aplicación	-	Taludes
	sig3max	MPa	1.11285
	Peso específico	MN/m3	0.0245
	Peso específico saturado	MN/m3	0.0251
	Altura promedio	m	50
Ajuste Mohr- Coulomb	C	MPa	1.53476
	Phi	degrees	52.6029
Parámetros del Macizo Rocosó	Sigt	MPa	-0.603743
	Sigc	MPa	9.81388
	Sigcm	MPa	16.2178
	Erm	MPa	19274.1
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

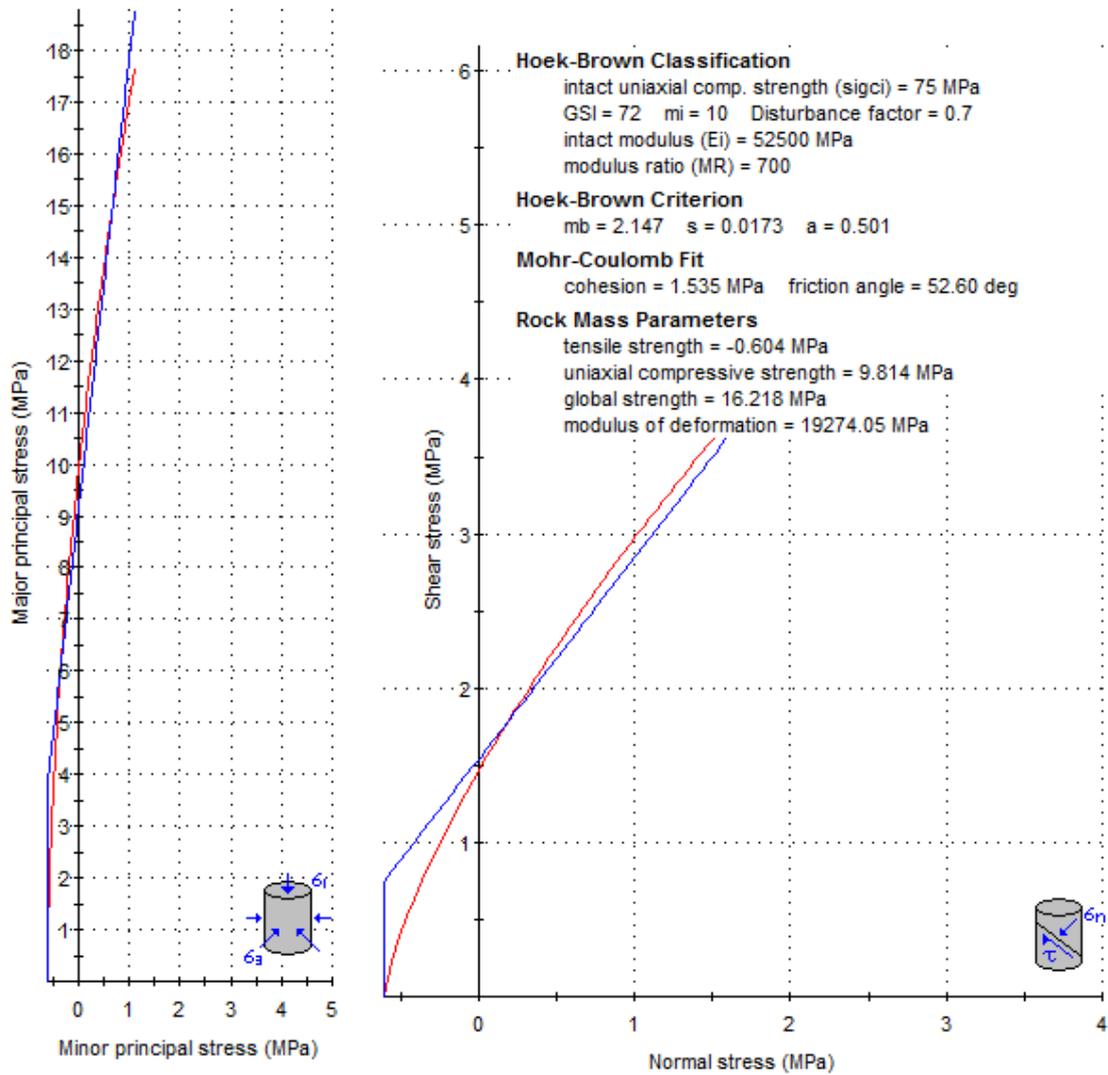


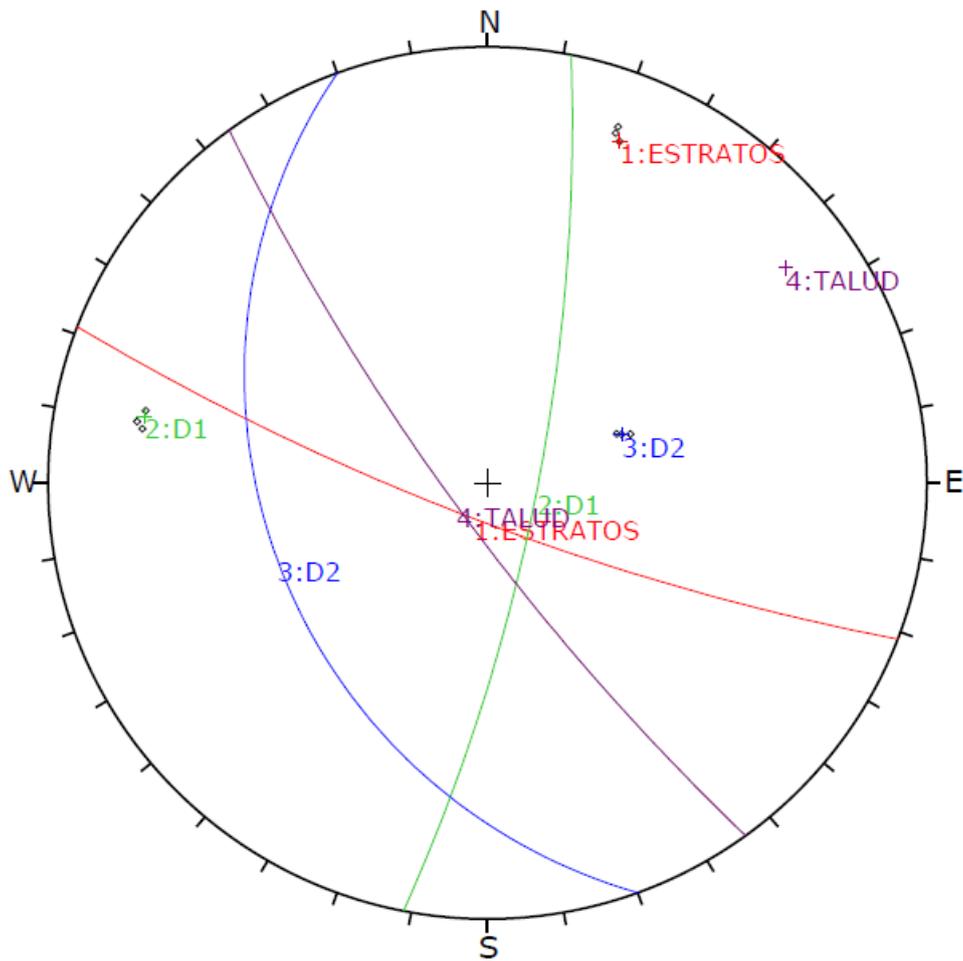
Figura 16. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las margas gris parduzcas de la Formación Yumagual en el tramo 04.

### 3.10.4.2. Discontinuidades

Tabla 19. Información resumida de discontinuidades de la estación 4

Estructura	Azimut	Dip	Dip Direction
Estrato	110	82	200
D1	10	78	100
D2	160	36	250
E	111	80	201
D1	12	77	102
D2	161	38	251
Talud	144	80	234

### 3.10.4.3. Planos Mayores



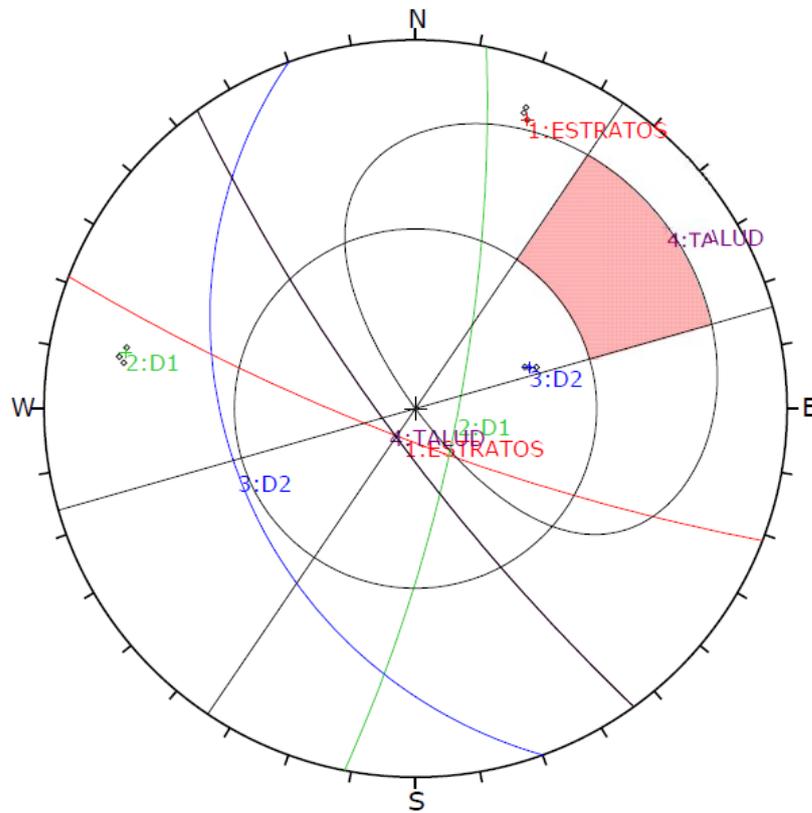
Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		80	201	ESTRATOS
2		77	101	D1
3		36	250	D2
4		80	234	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	9 (9 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

### 3.10.4.4. Análisis Cinemático

#### ✓ Rotura Planar



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	234		
<b>Friction Angle</b>	52°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Planar Sliding (All)	0	9	0.00%

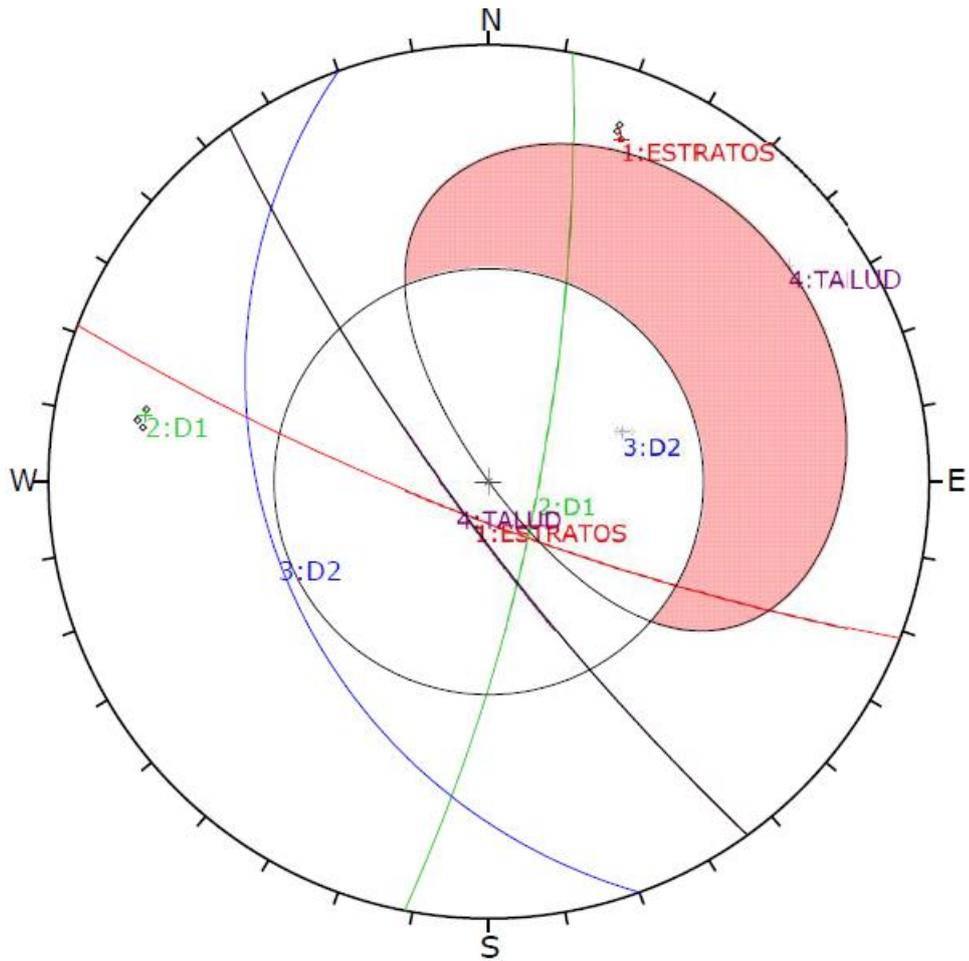
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	80	201	ESTRATOS
2	■	77	101	D1
3	■	36	250	D2
4	■	80	234	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	9 (9 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura Planar Sin Límites



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	234		
<b>Friction Angle</b>	52°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Planar Sliding (All)	0	9	0.00%

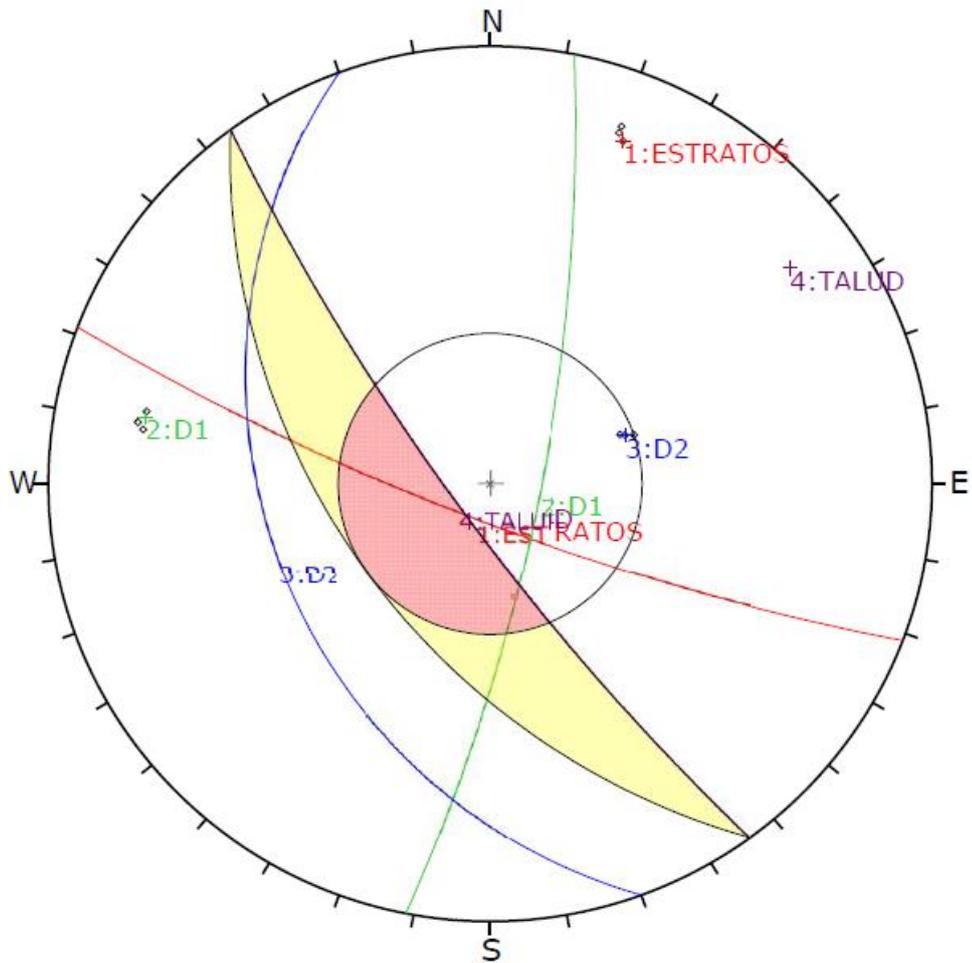
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	80	201	ESTRATOS
2	■	77	101	D1
3	■	36	250	D2
4	■	80	234	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	9 (9 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura En Cuña



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
□	Critical Intersection

<b>Kinematic Analysis</b>	Wedge Sliding
<b>Slope Dip</b>	80
<b>Slope Dip Direction</b>	234
<b>Friction Angle</b>	52°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	1	36	2.78%

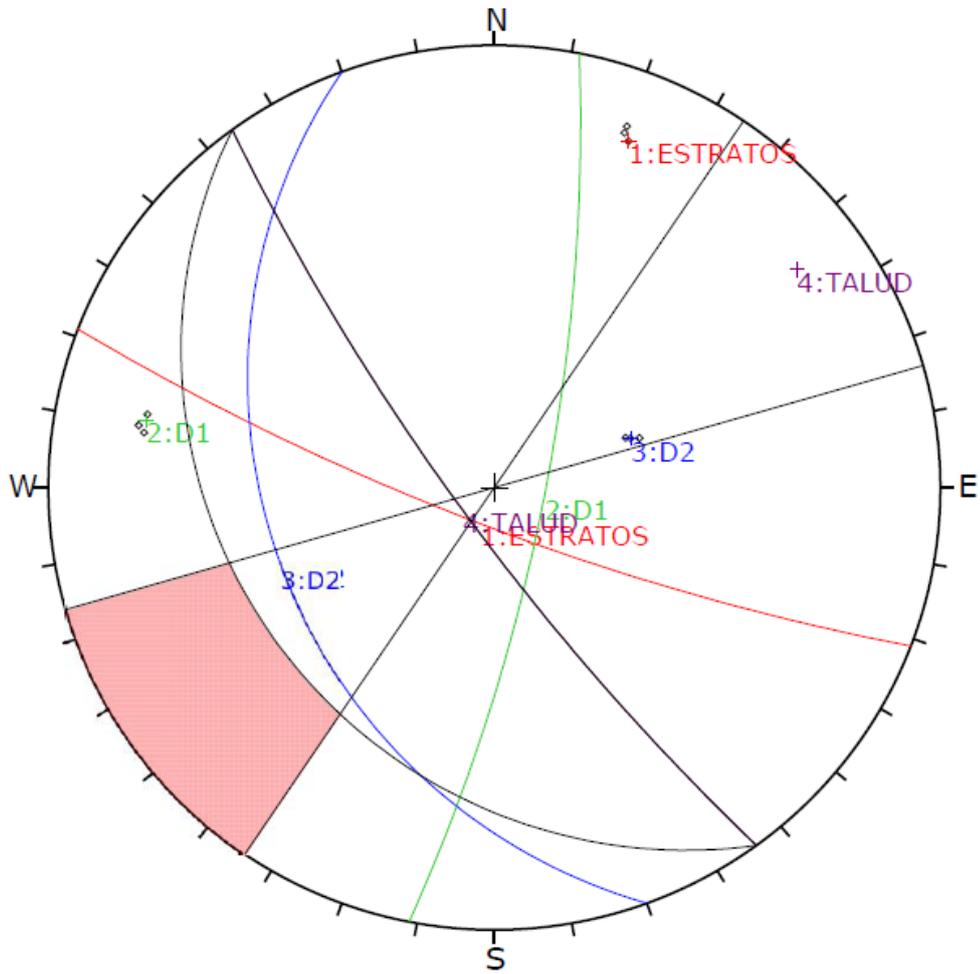
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	80	201	ESTRATOS
2	■	77	101	D1
3	■	36	250	D2
4	■	80	234	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	9 (9 Entries)
<b>Intersection Mode</b>	Grid Data Planes
<b>Intersections Count</b>	36
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura Por Volcamiento



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

<b>Kinematic Analysis</b>	Flexural Toppling		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	234		
<b>Friction Angle</b>	52°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Flexural Toppling (All)	0	9	0.00%

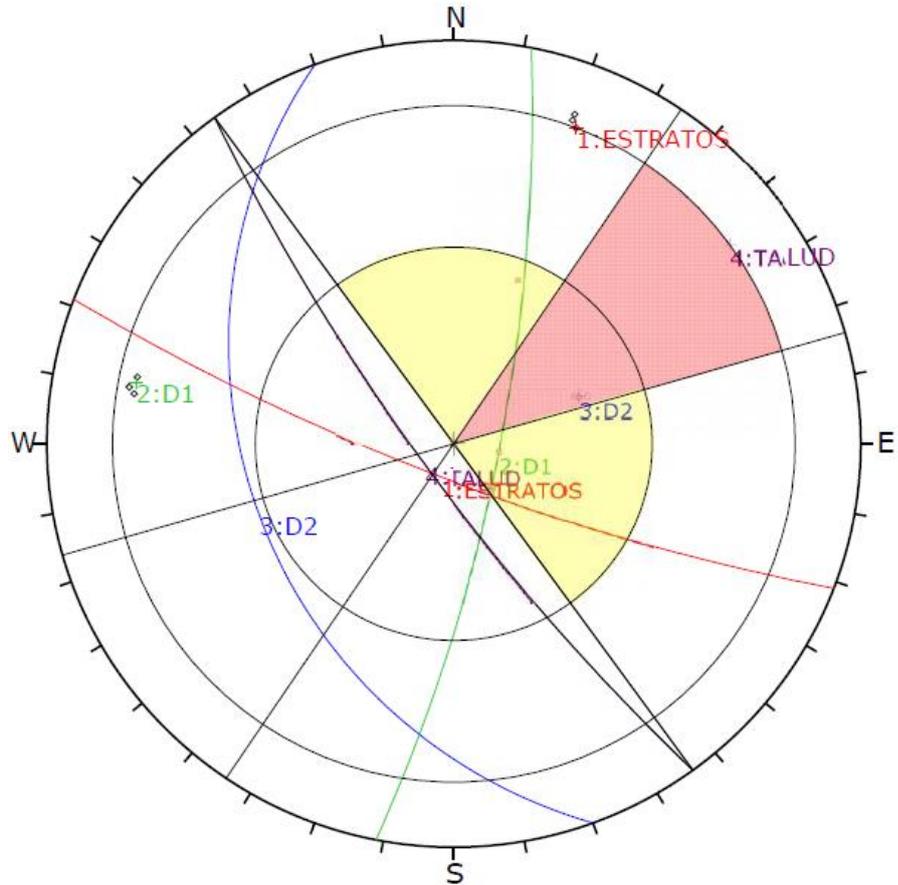
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	80	201	ESTRATOS
2	■	77	101	D1
3	■	36	250	D2
4	■	80	234	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	9 (9 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura Por Volcamiento Directo



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
□	Critical Intersection

<b>Kinematic Analysis</b>	Direct Toppling		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	234		
<b>Friction Angle</b>	52°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Direct Toppling (Intersection)	0	36	0.00%
Oblique Toppling (Intersection)	9	36	25.00%
Base Plane (All)	3	9	33.33%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	80	201	ESTRATOS
2	■	77	101	D1
3	■	36	250	D2
4	■	80	234	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	9 (9 Entries)
<b>Intersection Mode</b>	Grid Data Planes
<b>Intersections Count</b>	36
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

## ✓ Resumen

Tabla 20. Resumen de los resultados del análisis de la estación 4.

Tipo De Rotura	Probabilidad %
Planar	0
Planar Sin Límites	0
En Cuña	2.78
Por Volcamiento	0
Por Volcamiento Directo	33.33

### 3.10.5. Tramo 05

El talud se encuentra constituido por un Basamento de rocas perteneciente a la Formación Cajamarca (Ks-ca), conformando un de Depósito Cuaternario. El talud lo conforma un depósito coluvial compuesto por calizas gris oscuras o azuladas, con lutitas y margas muy frágiles como relleno.

Su geomorfología del talud corresponde a una pendiente de tipo Terreno muy escarpado formado por eventos geomorfológicos de erosión, cuenta con una pendiente de 71°, el cual lo vuelve inestable por su composición.



Foto 5. Talud en el tramo 05, Km.146+500 – Km.146+650

### 3.10.5.1. Propiedades.

Tabla 21. Propiedades del macizo rocoso del tramo 05.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Unidad Geológica: Ks-yu
Clasificación Hoek-Brown	Sigci	MPa	75
	GSI	-	75
	Mi	-	12
	D	-	0.7
	Ei	MPa	37500
	MR	-	500
Criterio Hoek-Brown	Mb	-	3.03825
	S	-	0.0266974
	A	-	0.500911
Rango de envoltura de rotura	Aplicación	-	Taludes
	sig3max	MPa	1.17335
	Peso específico	MN/m3	0.0255
	Peso específico saturado	MN/m3	0.0265
	Altura promedio	m	50
Ajuste Mohr-Coulomb	C	MPa	1.79363
	Phi	degrees	54.7501
Parámetros del Macizo Rocosó	Sigt	MPa	-0.659034
	Sigc	MPa	12.2141
	Sigcm	MPa	19.4885
	Erm	MPa	15396.2
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

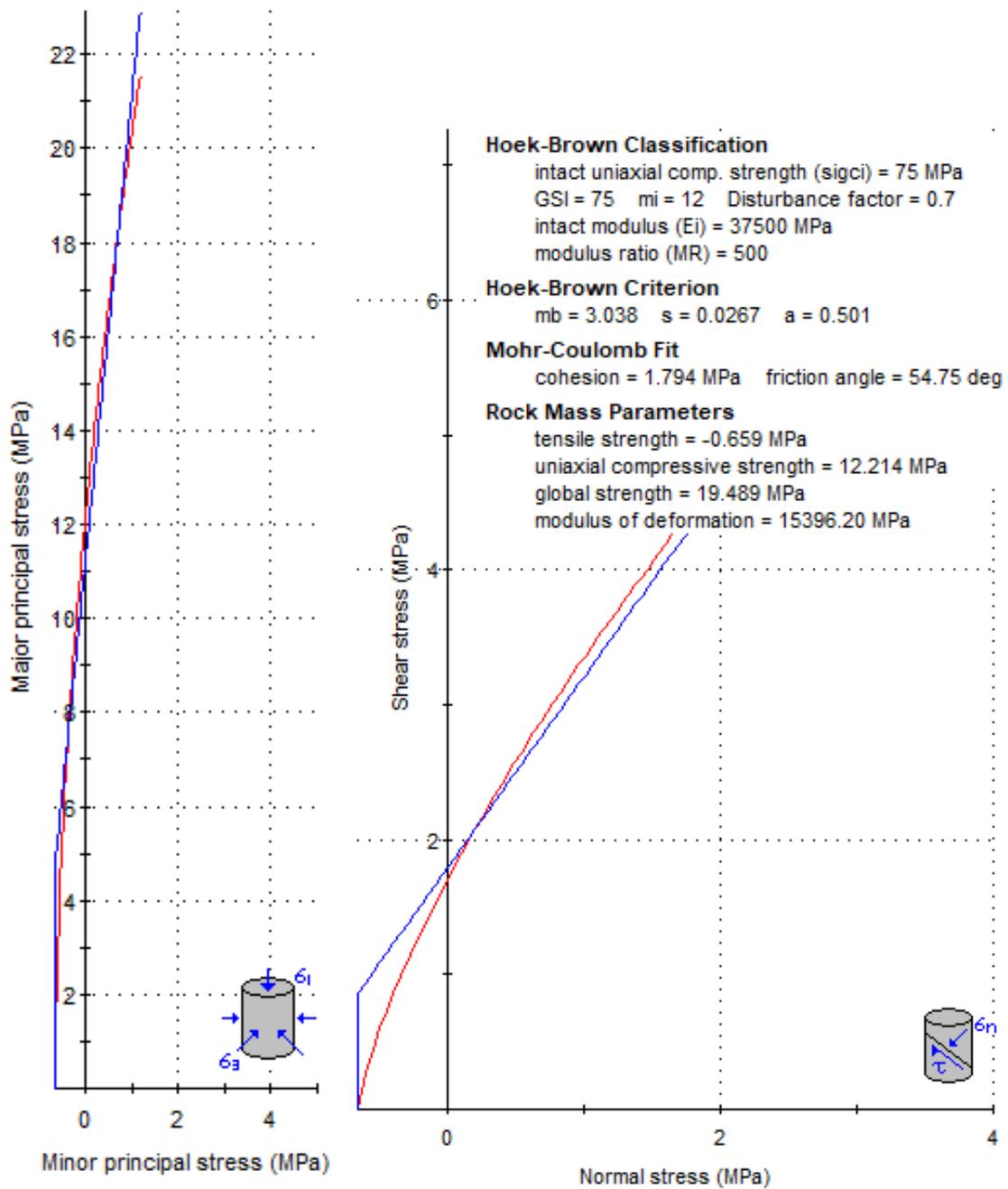


Figura 17. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las margas gris parduzcas de la Formación Yumagual en el tramo 05.

Tabla 22. Propiedades del suelo del tramo 05.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Qh-co
Tipo de Depósito	-	-	Coluvial
Tipo de suelo	SUCS	-	CH
Peso específico	Seco	KN/m3	19
	Saturado	KN/m3	24
Criterio de Mohr-Coulomb	Cohesión	kPa	25
	Ángulo de fricción	grados	40
	Resistencia tensional	kPa	-5
	Resistencia a la compresión uniaxial	kPa	107.225
	Alpha	grados	77.7324
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

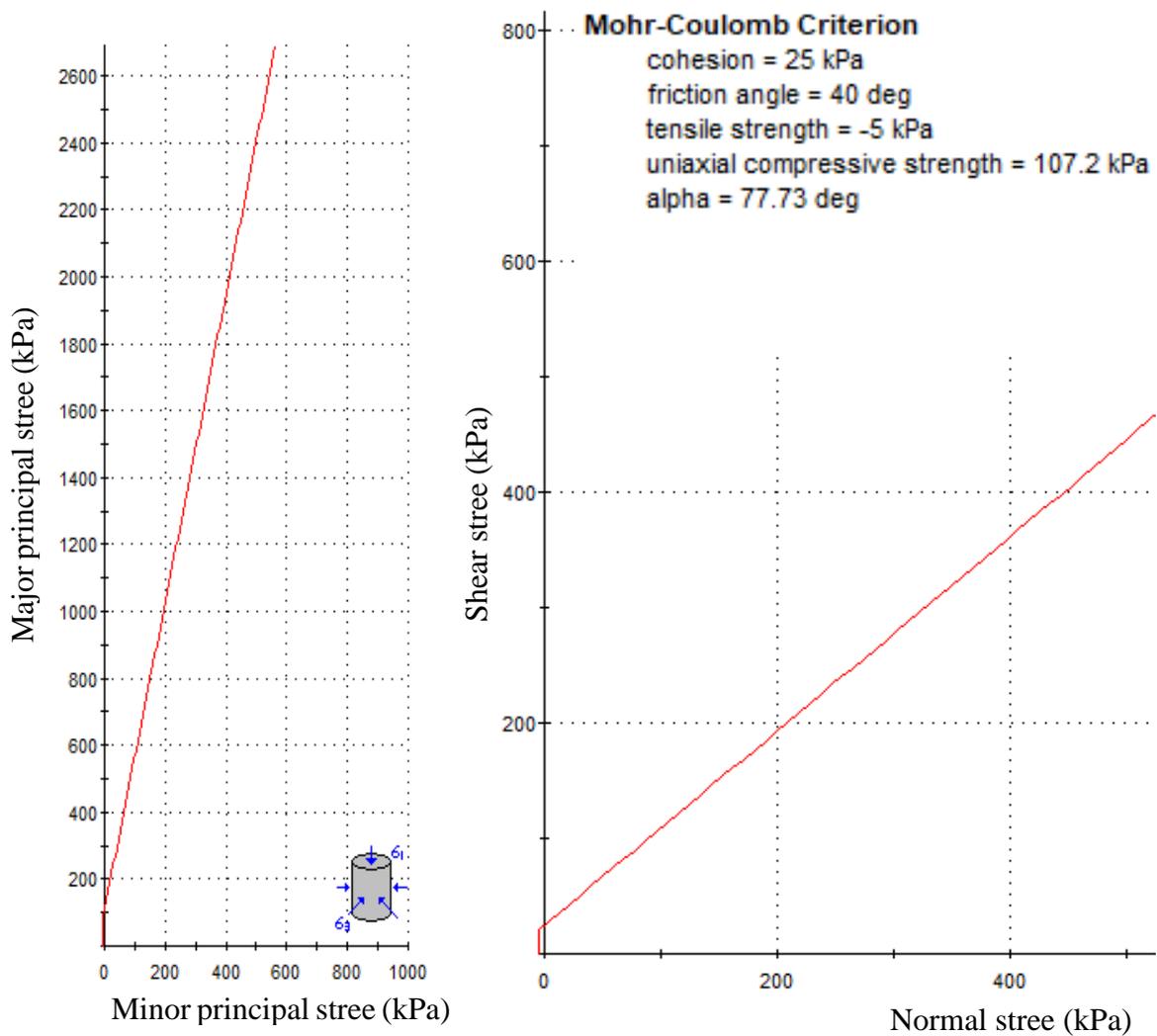


Figura 18. Interpretación en RocData del tramo 05.

### 3.10.6. Tramo 06

El talud está constituido por calizas gris oscuras o azuladas, con delgados lechos de lutitas y margas de la Formación Cajamarca (Ks-ca), Geodinámicamente los planos de estratificación están buzando en contra de la carretera, los cuales están siendo afectada por la precipitación lo cual erosiona e inestabiliza el talud. Presentándose moderadamente meteorizada; conformando dos familias de discontinuidades.



Foto 6. Talud en el tramo 06, Km.146+200 – Km.146+280.

#### 3.10.6.1. Propiedades.

Tabla 23. Propiedades del macizo rocoso del tramo 06.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Unidad Geológica: Ks-ca
Clasificación Hoek-Brown	Sigci	MPa	75
	GSI	-	55
	Mi	-	10
	D	-	0.7
	Ei	MPa	52500
	MR	-	700
Criterio Hoek-Brown	Mb	-	0.843713
	S	-	0.00147111
	A	-	0.504048
Rango de envoltura de rotura	Aplicación	-	Taludes
	sig3max	MPa	1.05788
	Peso específico	MN/m <sup>3</sup>	0.0245

	Peso específico saturado	MN/m3	0.0251
	Altura promedio	M	50
Ajuste Mohr-Coulomb	C	MPa	0.576547
	Phi	degrees	47.9179
Parámetros del Macizo Rocosó	Sigt	MPa	-0.130771
	Sigc	MPa	2.80168
	Sigcm	MPa	9.23751
	Erm	MPa	7751.38
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

Propiedad	Parámetro	Unidad	Unidad Geológica: Ks-ca
Clasificación Hoek-Brown	Sigci	MPa	75
	GSI	-	55
	Mi	-	10
	D	-	0.7
	Ei	MPa	52500
	MR	-	700
Criterio Hoek-Brown	Mb	-	0.843713
	S	-	0.00147111
	A	-	0.504048
Rango de envoltura de rotura	Aplicación	-	Taludes
	sig3max	MPa	1.05788
	Peso específico	MN/m3	0.0245
	Peso específico saturado	MN/m3	0.0251
	Altura promedio	M	50
Ajuste Mohr-Coulomb	C	MPa	0.576547
	Phi	degrees	47.9179
Parámetros del Macizo Rocosó	Sigt	MPa	-0.130771
	Sigc	MPa	2.80168
	Sigcm	MPa	9.23751
	Erm	MPa	7751.38
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

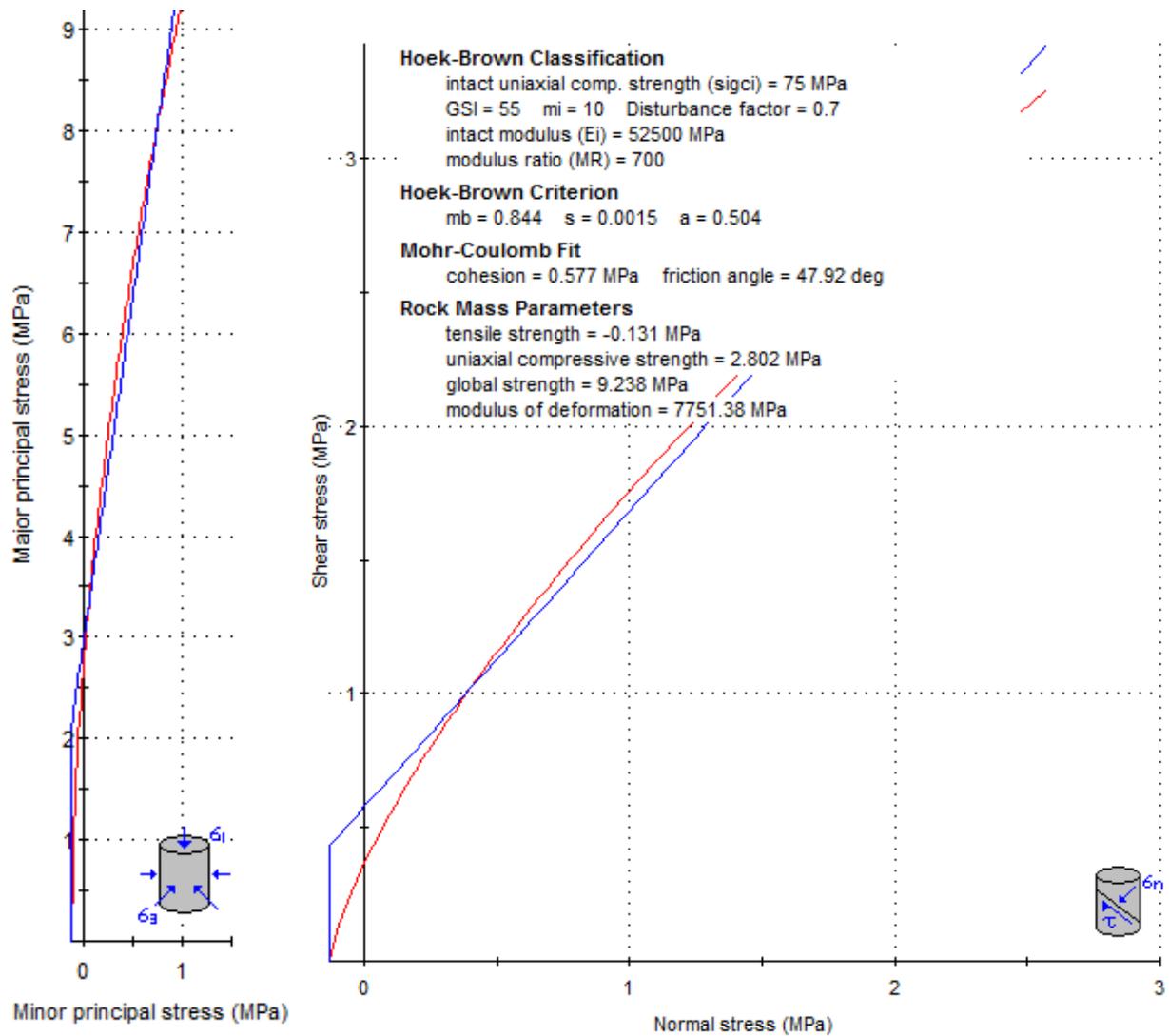


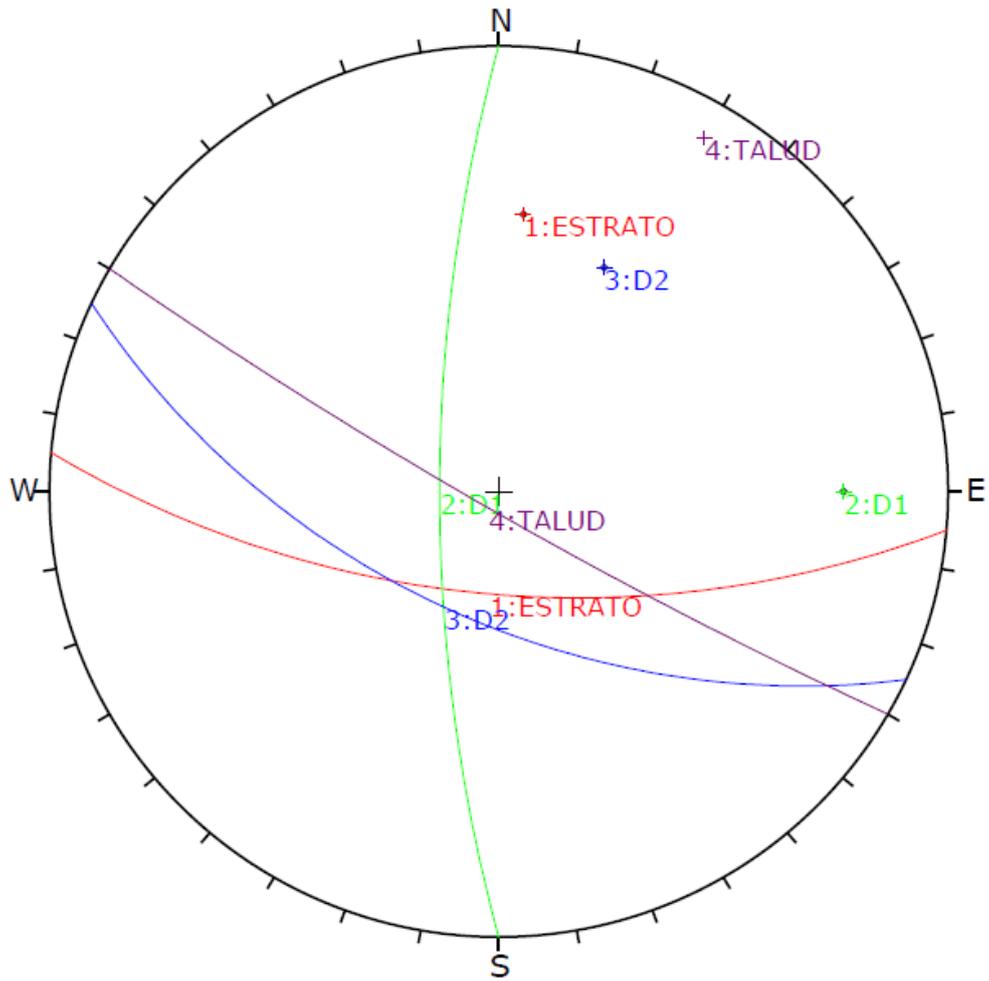
Figura 19. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las calizas grises oscuras o azuladas de la Fm. Cajamarca en el tramo 06.

### 3.10.6.2. Discontinuidades

Tabla 24. Información resumida de discontinuidades de la estación 6.

Estructura	Azimut	Dip	Dip Direction
Estrato	95	64	185
D1	180	75	270
D2	115	58	205
Talud	120	85	210

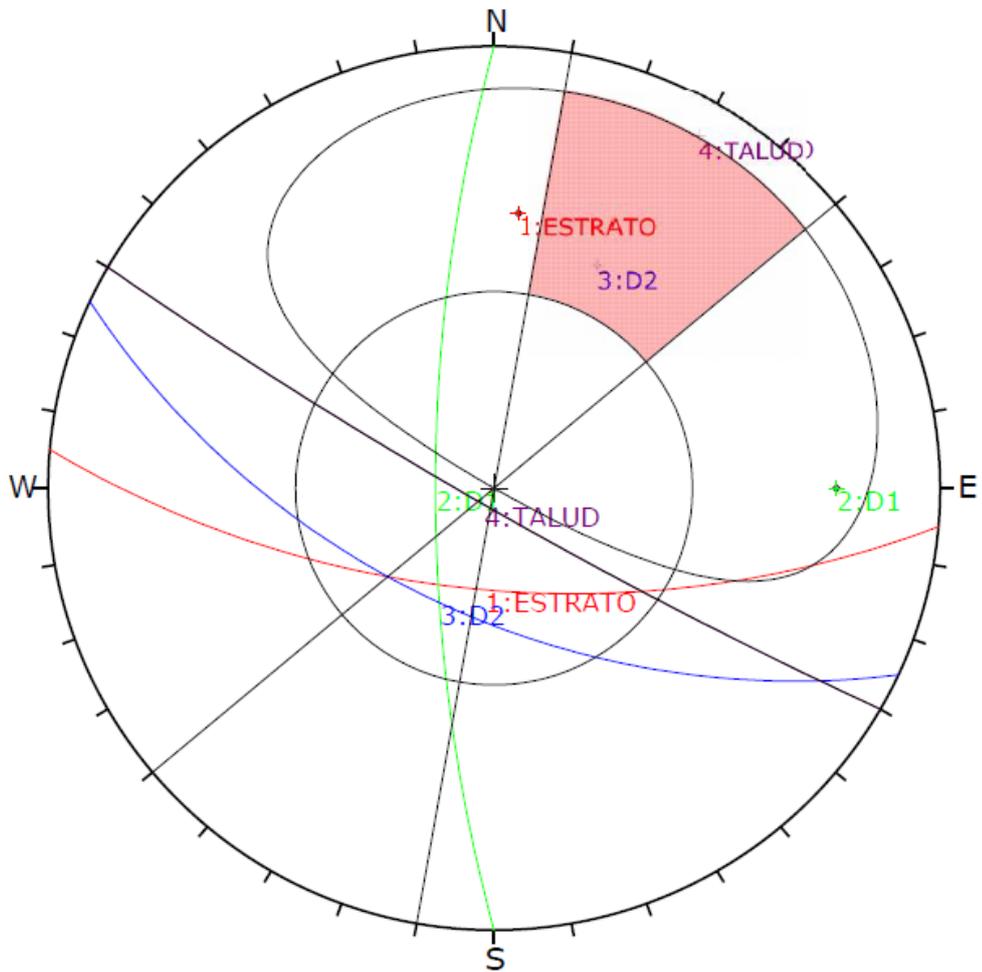
### 3.10.6.3. Planos Mayores



Symbol	Feature			
◇	Pole Vectors			
	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	64	185	ESTRATO
2	■	75	270	D1
3	■	58	205	D2
4	■	85	210	TALUD
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		3 (3 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Angle		

### 3.9.6.4. Análisis Cinemático

#### ✓ Rotura Planar



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding		
<b>Slope Dip</b>	85		
<b>Slope Dip Direction</b>	210		
<b>Friction Angle</b>	48°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Planar Sliding (All)	1	3	33.33%

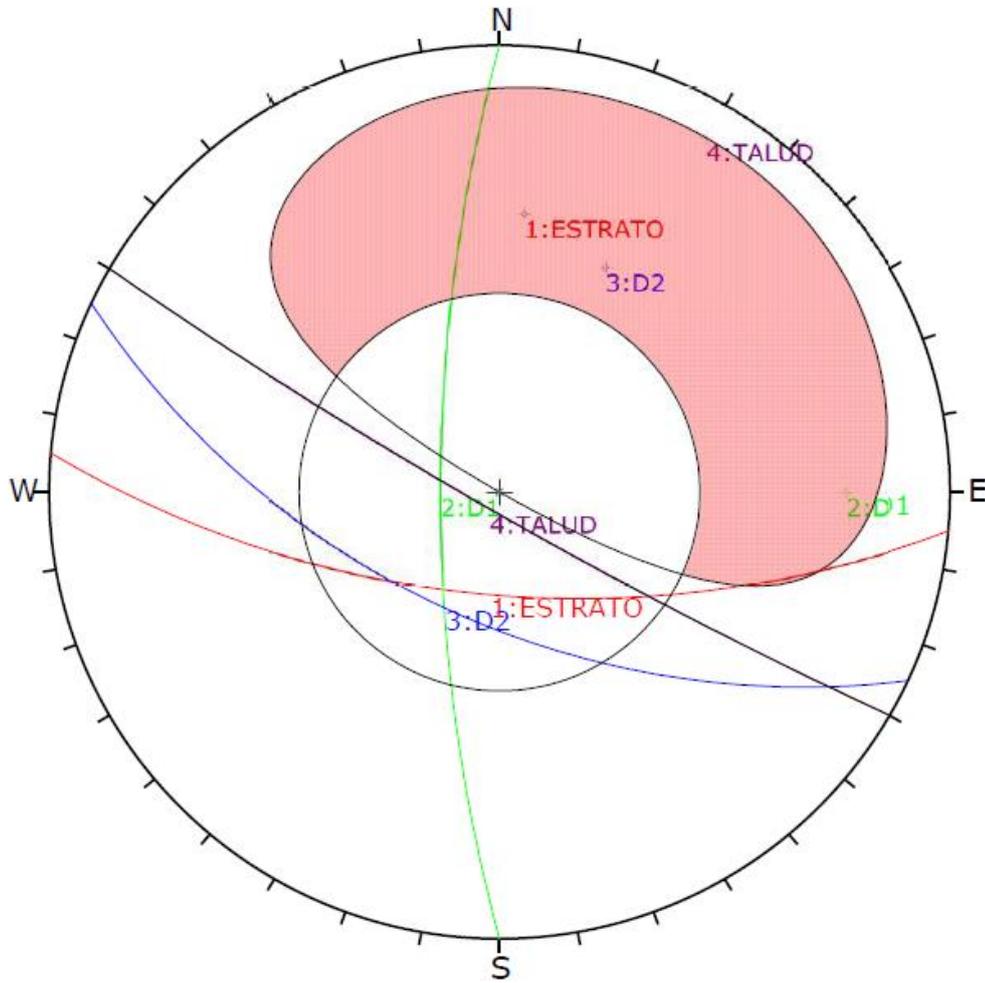
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	64	185	ESTRATO
2	■	75	270	D1
3	■	58	205	D2
4	■	85	210	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura Planar Sin Límites



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding		
<b>Slope Dip</b>	85		
<b>Slope Dip Direction</b>	210		
<b>Friction Angle</b>	48°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Planar Sliding (All)	3	3	100.00%

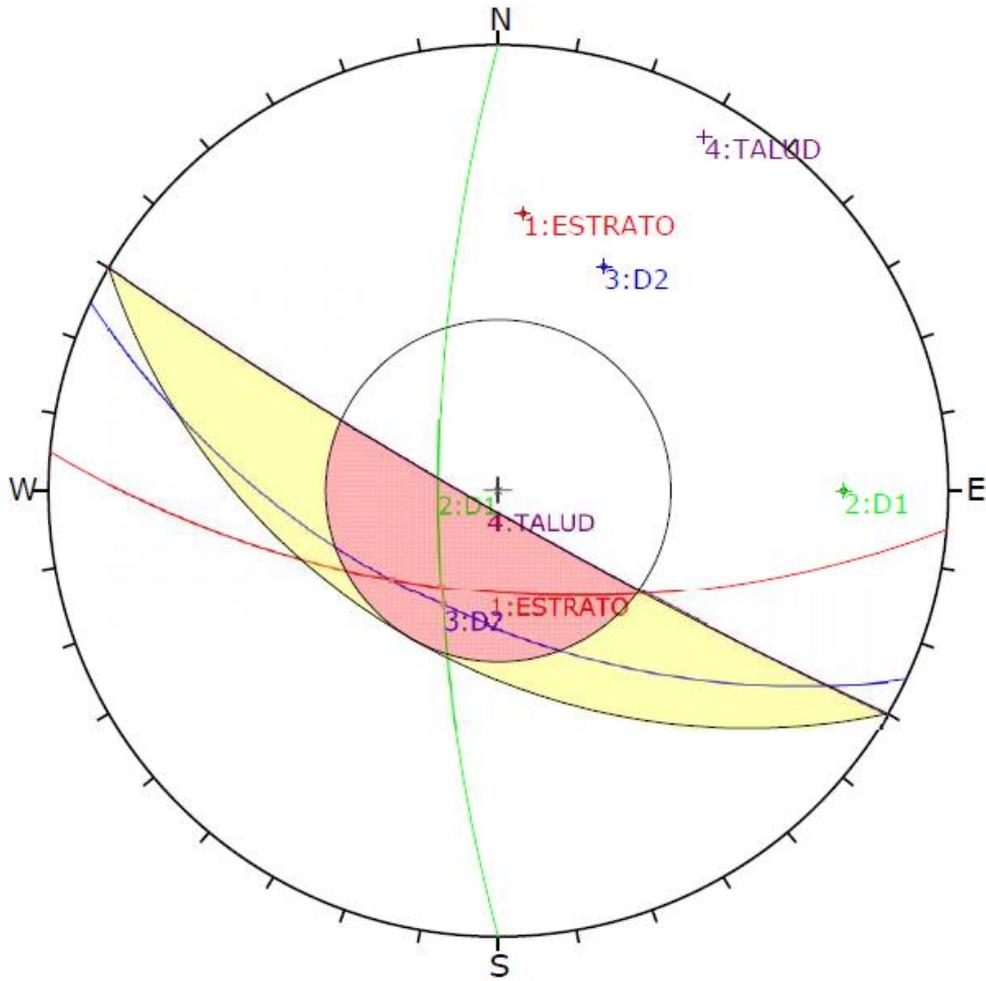
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	64	185	ESTRATO
2	■	75	270	D1
3	■	58	205	D2
4	■	85	210	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura En Cuña



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
■	Critical Intersection

<b>Kinematic Analysis</b>	Wedge Sliding		
<b>Slope Dip</b>	85		
<b>Slope Dip Direction</b>	210		
<b>Friction Angle</b>	48°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Wedge Sliding	3	3	100.00%

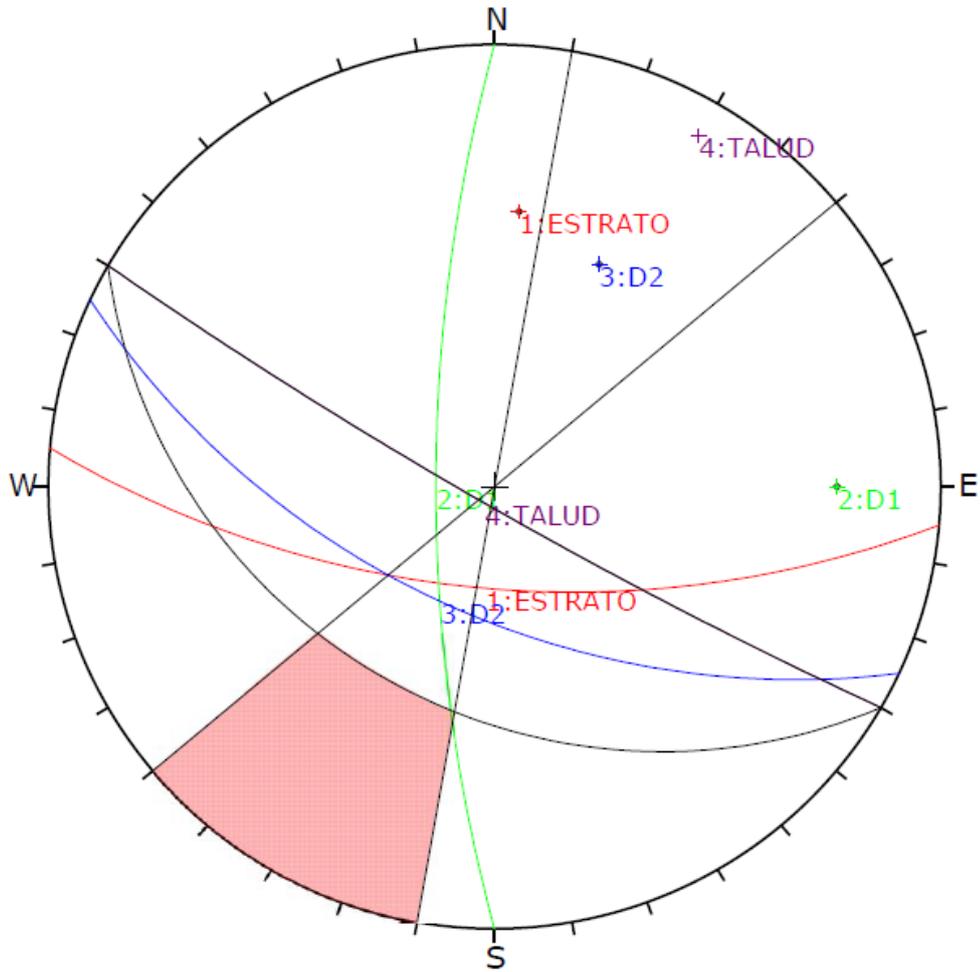
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	Red	64	185	ESTRATO
2	Green	75	270	D1
3	Blue	58	205	D2
4	Purple	85	210	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Intersection Mode</b>	Grid Data Planes
<b>Intersections Count</b>	3
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura Por Volcamiento



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

<b>Kinematic Analysis</b>	Flexural Toppling		
<b>Slope Dip</b>	85		
<b>Slope Dip Direction</b>	210		
<b>Friction Angle</b>	48°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Flexural Toppling (All)	0	3	0.00%

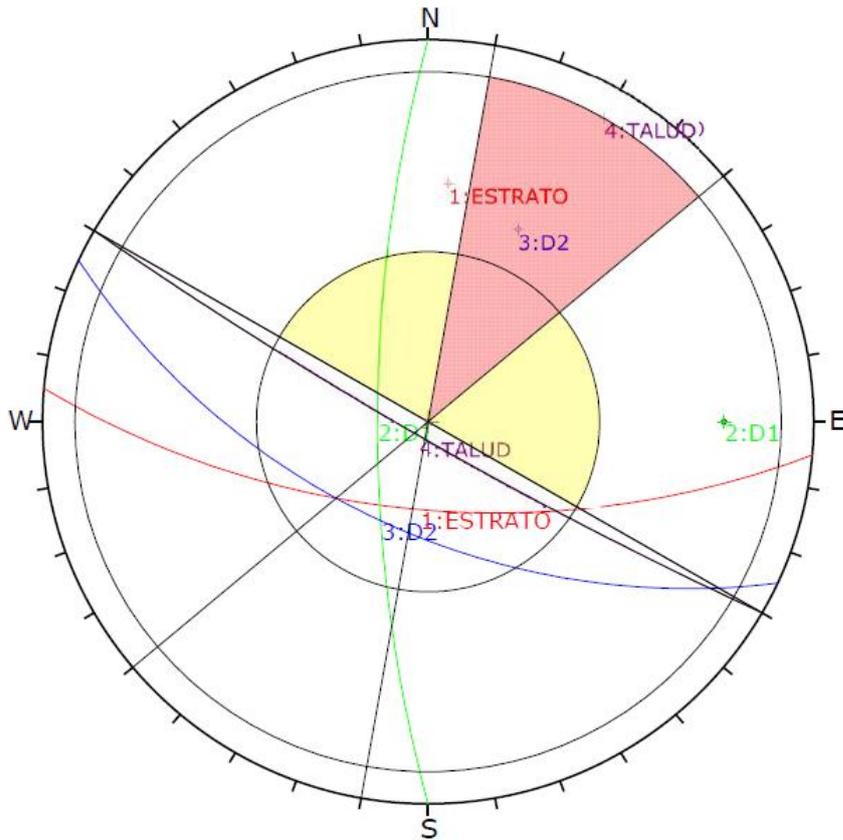
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	Red	64	185	ESTRATO
2	Green	75	270	D1
3	Blue	58	205	D2
4	Purple	85	210	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ **Rotura Por Volcamiento Directo**



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
□	Critical Intersection

<b>Kinematic Analysis</b>	Direct Toppling		
<b>Slope Dip</b>	85		
<b>Slope Dip Direction</b>	210		
<b>Friction Angle</b>	48°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Direct Toppling (Intersection)	0	3	0.00%
Oblique Toppling (Intersection)	0	3	0.00%
Base Plane (All)	1	3	33.33%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	Red	64	185	ESTRATO
2	Green	75	270	D1
3	Blue	58	205	D2
4	Purple	85	210	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Intersection Mode</b>	Grid Data Planes
<b>Intersections Count</b>	3
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

## ✓ Resumen

Tabla 25. Resumen de los resultados del análisis de la estación 6.

Tipo De Rotura	Probabilidad %
Planar	33.33
Planar Sin Límites	100
En Cuña	100
Por Volcamiento	0
Por Volcamiento Directo	33.33

### 3.10.7. Tramo 07

El talud está conformado por rocas de la Formación Cajamarca (Ks-ca), caracterizada por una secuencia de calizas, con delgados lechos de lutitas y margas en bancos consistentes más o menos uniformes. Lo constituyen calizas altamente alteradas que han sufrido procesos geodinámicos cuyos resultados son derrumbes de rocas generados por la erosión y meteorización.



Foto 7. Talud en el tramo 07, Km.145+570 – Km.145+620.

### 3.10.7.1. Propiedades.

Tabla 26. Propiedades del macizo rocoso del tramo 07.

Propiedad	Parámetro	Unidad	Unidad Geológica: Ks-ca
Clasificación Hoek-Brown	Sigci	MPa	75
	GSI	-	75
	Mi	-	10
	D	-	0.7
	Ei	MPa	52500
	MR	-	700
Criterio Hoek-Brown	Mb	-	2.53187
	S	-	0.0266974
	A	-	0.500911
Rango de envoltura de rotura	Aplicación	-	Taludes
	sig3max	MPa	1.12427
	Peso específico	MN/m3	0.0245
	Peso específico saturado	MN/m3	0.0251
	Altura promedio	M	50
Ajuste Mohr-Coulomb	c	MPa	1.8963
	phi	degrees	53.04
Parámetros del Macizo Rocosos	sigt	MPa	-0.79084
	sigc	MPa	12.2141
	sigcm	MPa	18.1656
	Erm	MPa	21554.7
Tipo de material	Mogi	-	Frágil

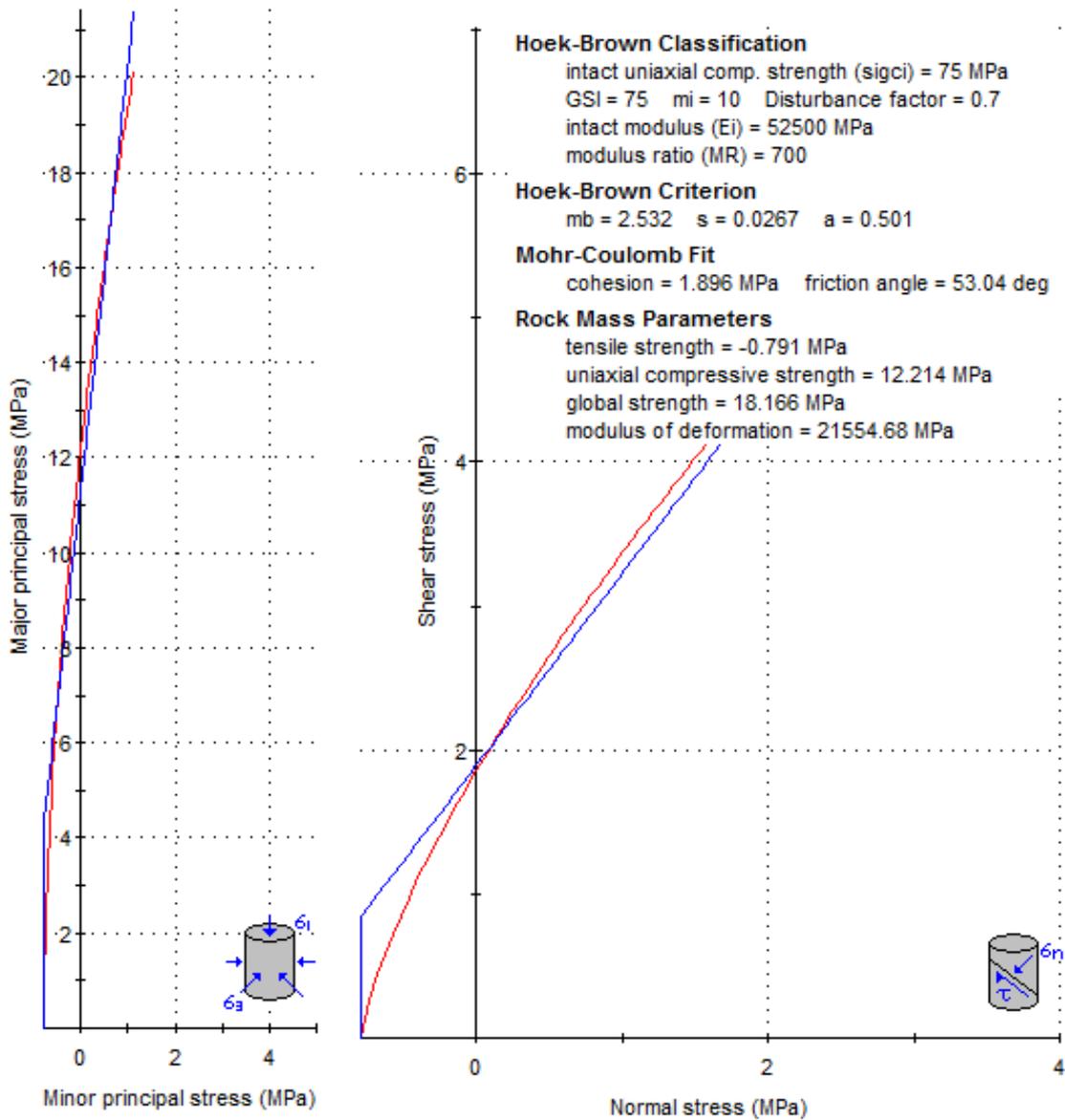


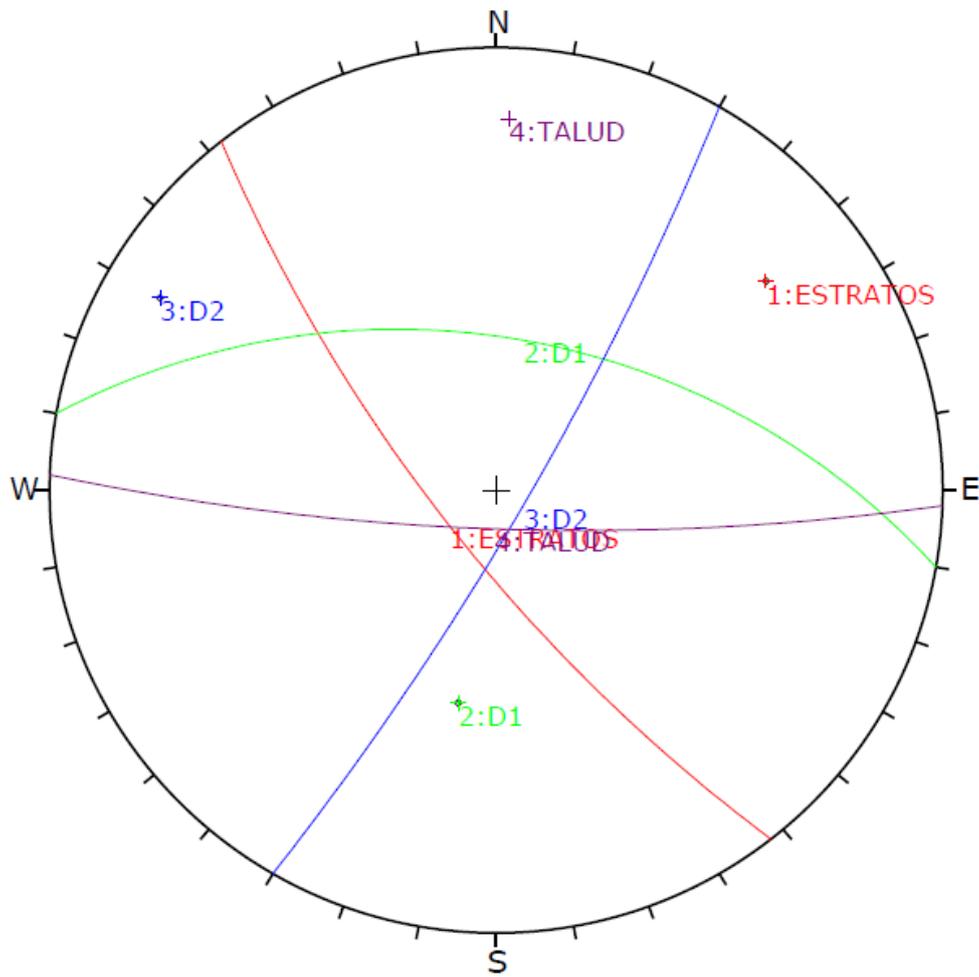
Figura 20. Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) en las calizas grises oscuras o azuladas de la Fm. Cajamarca en el tramo 07.

### 3.10.7.2. Discontinuidades

Tabla 27. Información resumida de discontinuidades de la estación 7.

Estructura	Azimut	Dip	Dip Direction
Estrato	142	75	232
D1	280	52	10
D2	30	82	120
Talud	92	80	182

### 3.10.7.3. Planos Mayores



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

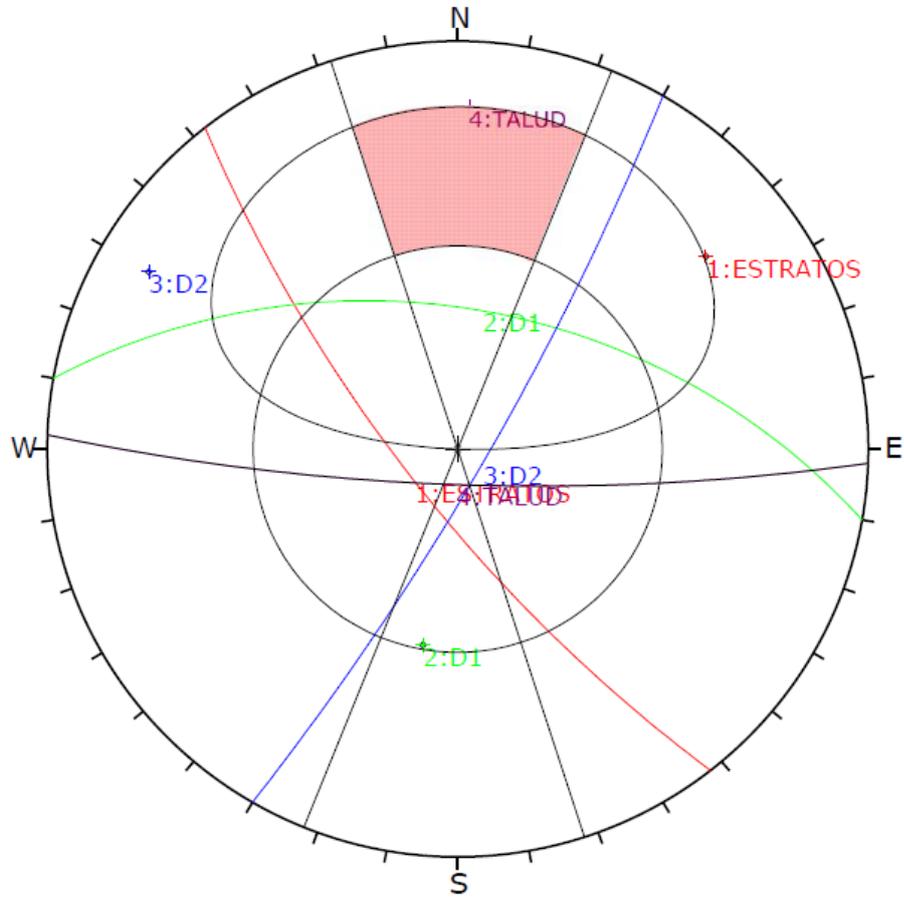
	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		75	232	ESTRATOS
2		52	10	D1
3		82	120	D2
4		80	182	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

### 3.9.7.4. Análisis Cinemático

#### ✓ Rotura Planar



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding
<b>Slope Dip</b>	80
<b>Slope Dip Direction</b>	182
<b>Friction Angle</b>	53°
<b>Lateral Limits</b>	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	0	3	0.00%

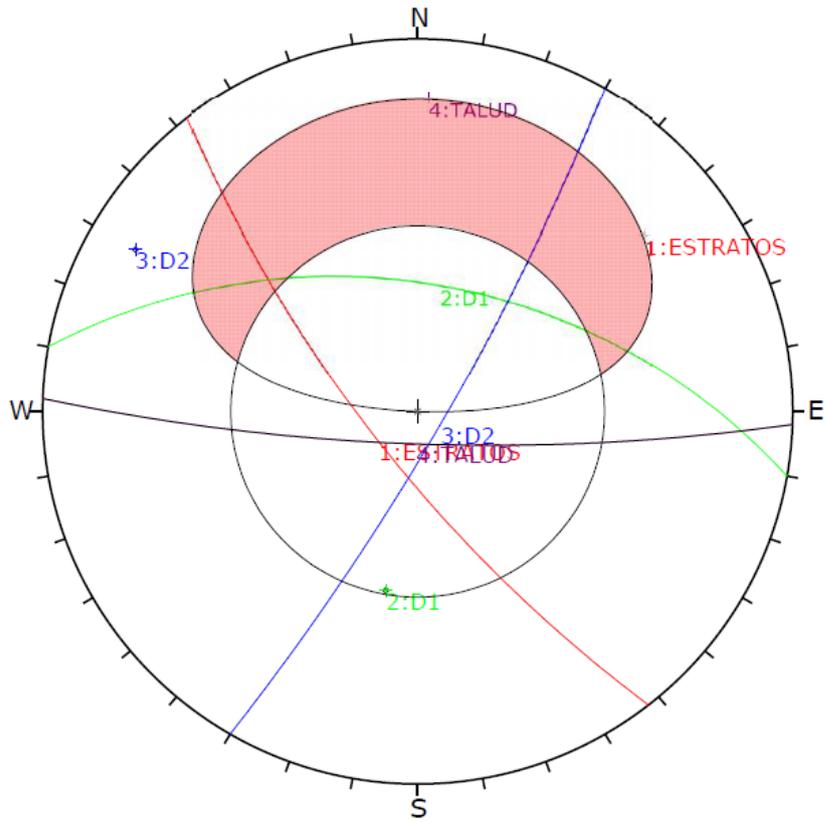
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	Red	75	232	ESTRATOS
2	Green	52	10	D1
3	Blue	82	120	D2
4	Purple	80	182	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura Planar Sin Límites



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	182		
<b>Friction Angle</b>	53°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Planar Sliding (All)	0	3	0.00%

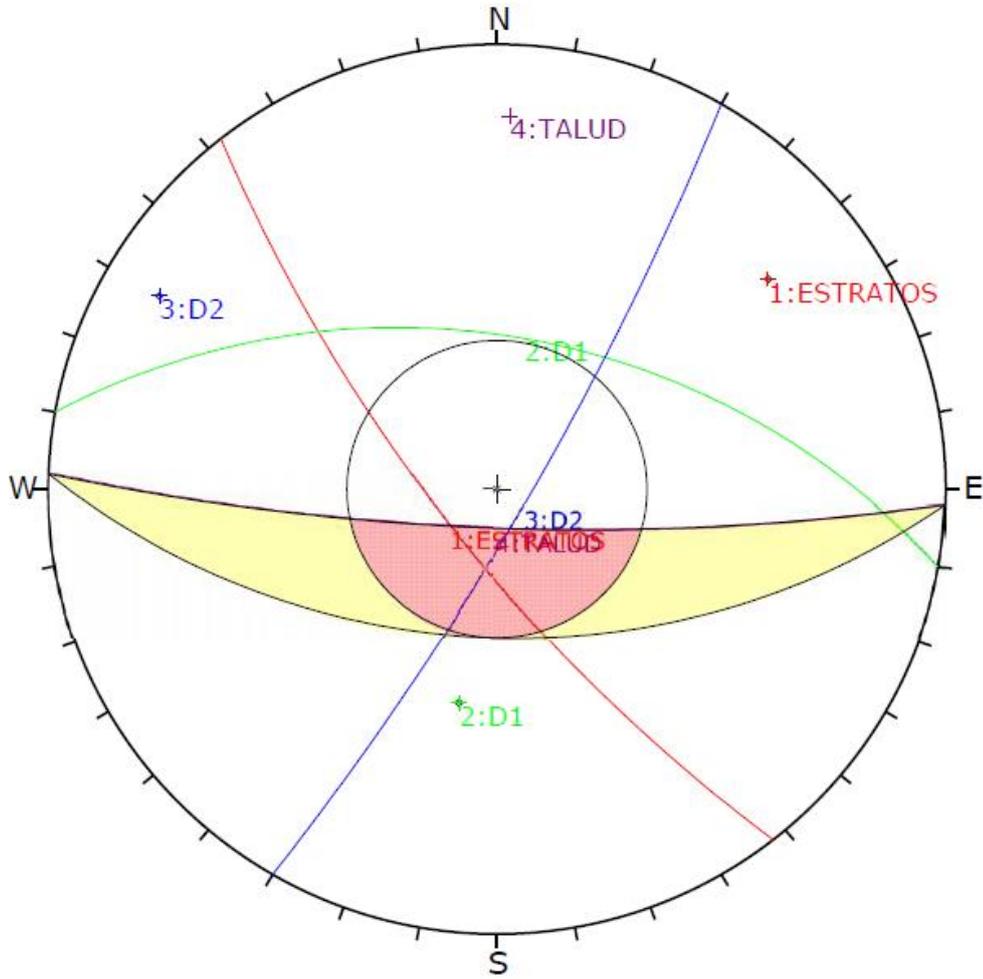
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	Red	75	232	ESTRATOS
2	Green	52	10	D1
3	Blue	82	120	D2
4	Purple	80	182	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura En Cuña



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
■	Critical Intersection

<b>Kinematic Analysis</b>	Wedge Sliding		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	182		
<b>Friction Angle</b>	53°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Wedge Sliding	1	3	33.33%

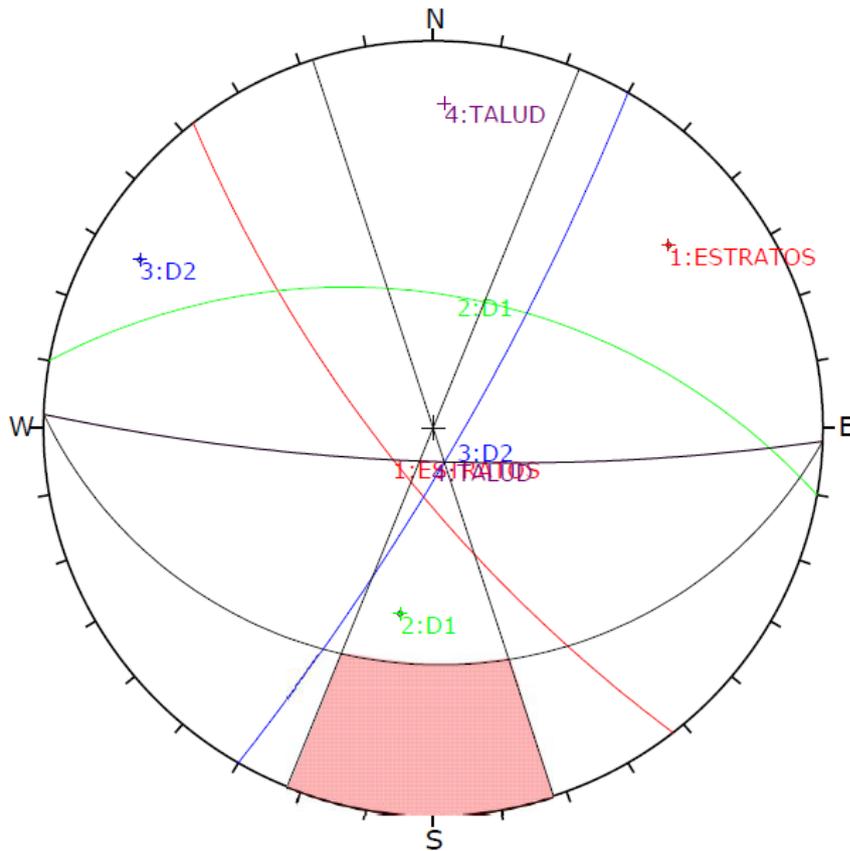
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	75	232	ESTRATOS
2	■	52	10	D1
3	■	82	120	D2
4	■	80	182	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Intersection Mode</b>	Grid Data Planes
<b>Intersections Count</b>	3
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ Rotura Por Volcamiento



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

<b>Kinematic Analysis</b>	Flexural Toppling
<b>Slope Dip</b>	80
<b>Slope Dip Direction</b>	182
<b>Friction Angle</b>	53°
<b>Lateral Limits</b>	20°

	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	0	3	0.00%

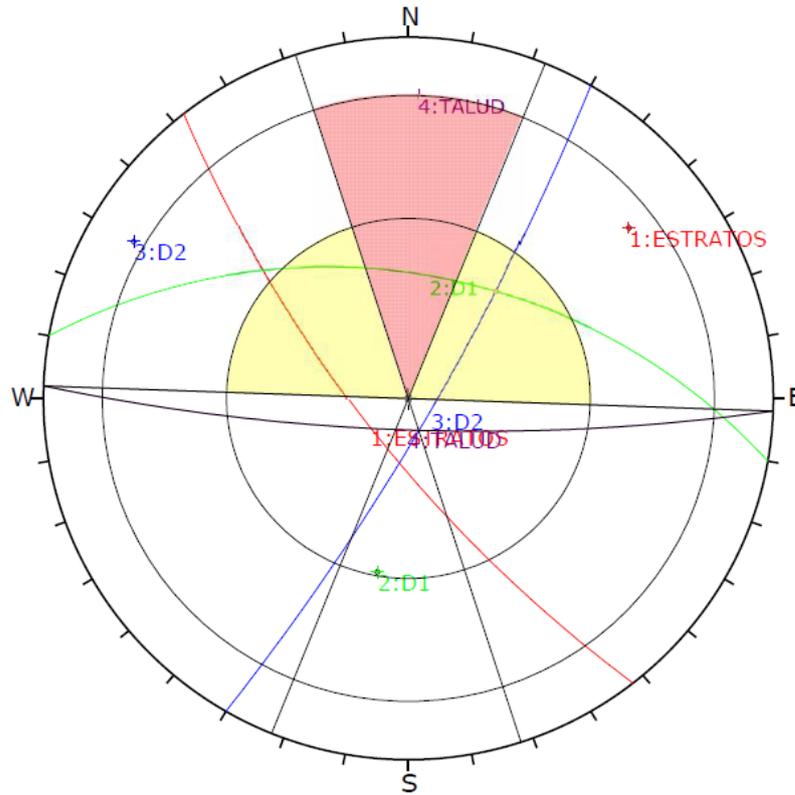
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	75	232	ESTRATOS
2	■	52	10	D1
3	■	82	120	D2
4	■	80	182	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ **Rotura Por Volcamiento Directo**



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
■	Critical Intersection

<b>Kinematic Analysis</b>	Direct Toppling		
<b>Slope Dip</b>	80		
<b>Slope Dip Direction</b>	182		
<b>Friction Angle</b>	53°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Direct Toppling (Intersection)	0	3	0.00%
Oblique Toppling (Intersection)	1	3	33.33%
Base Plane (All)	0	3	0.00%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	75	232	ESTRATOS
2	■	52	10	D1
3	■	82	120	D2
4	■	80	182	TALUD

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	3 (3 Entries)
<b>Intersection Mode</b>	Grid Data Planes
<b>Intersections Count</b>	3
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

✓ **Resumen**

Tabla 28. Resumen de los resultados del análisis de la estación 7.

<b>Tipo De Rotura</b>	<b>Probabilidad %</b>
Planar	0
Planar Sin Límites	0
En Cuña	33.33
Por Volcamiento	0
Por Volcamiento Directo	33.33

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación tiene como resultados a determinados factores de seguridad en los taludes ya sea en: rocas y suelos las mismas que se encuentran en la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios el tramo km.142+000 - km.150+000. Así mismo las zonas críticas identificadas van desde moderado hasta muy inestables, las cuales sumado a las intensas precipitaciones entre los meses de diciembre a marzo generan deslizamientos y caída de rocas, esto significa que se deben determinar medidas de estabilización de acuerdo a las condiciones de cada talud.

##### 4.1.1. Estaciones analizadas frente a rotura en suelos

Corresponde a las estaciones 2, 3 y 5, cuya ubicación se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 29. Coordenadas de la ubicación de las estaciones geotécnicas 2, 3 y 5, conformados principalmente por suelos.

Estación	Talud	Perfil	Km	Este	Norte	Altitud
2	Suelos	A-A'	149.30	774856	9196133	2652
3	Suelos	B-B'	148.55	774178	9195724	2618
5	Suelos	C-C'	146.55	774664	9194513	2513

En estas estaciones se utilizó el software Slide para calcular el factor de seguridad en escenarios de condiciones naturales, saturación parcial, saturación total, sismicidad máxima, y en sismicidad máxima-saturación parcial. Los resultados fueron contrastados por la normativa AASHTO LRFD, la cual indicia que para el factor de seguridad de un

talud sea considerado acatable, debe ser superior a 1.53 para diseños permanentes (condición natural del talud), 1.33 para taludes temporales (saturación parcial o saturación total) y 1.1 en análisis sísmico (sismicidad máxima o sismicidad máxima-saturación parcial). El resumen de los resultados se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 30. Factores de seguridad calculados en las estaciones de suelos, en amarillo las condiciones estables, pero con diseño no aceptable (factor de seguridad inferior a la normativa) y en naranjado los taludes inestables (los taludes fallaran si se presenta ese estado).

Perfil	Estados	Spencer	GLE/Morgenstern-Price
A-A'	Condiciones Naturales	1.282	1.281
	Saturación Parcial	1.024	1.027
	Saturación Total	0.662	0.664
	Sismicidad Máxima	0.859	0.855
	Sismicidad Máxima Y Saturación Parcial	0.809	0.702
B-B'	Condiciones Naturales	1.101	1.109
	Saturación Parcial	0.756	0.748
	Saturación Total	0.359	0.351
	Sismicidad Máxima	0.854	0.823
	Sismicidad Máxima Y Saturación Parcial	0.480	0.479
C-C'	Condiciones Naturales	1.399	1.404
	Saturación Parcial	1.081	1.074
	Saturación Total	0.530	0.527
	Sismicidad Máxima	0.993	0.993
	Sismicidad Máxima Y Saturación Parcial	0.727	0.733

De la tabla anterior se deduce que las estaciones 2, 3 y 5 (Perfiles A-A', B-B' y C-C') son estables en condiciones normales y en saturación parcial (Sólo perfiles A-A' y C-C'), pero su factor de seguridad no logra el mínimo requerido por la normativa, por lo que su diseño no es aceptable. En los demás estados, los taludes fallarán (factor de seguridad menor a 1), por lo que se deben realizar mayores estudios de medidas de estabilización.

#### 4.1.2. Estaciones analizadas frente a rotura del macizo rocoso

Corresponde a las estaciones 1, 4, 6 y 7, cuya ubicación se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 31. Ubicación de las estaciones analizadas frente a rotura del macizo rocoso.

Estación	Talud	Km	Este	Norte	Altitud
1	Macizo Rocos	149.70	774813	9196500	2634
4	Macizo Rocos	148.15	774071	9195533	2625
6	Macizo Rocos	146.25	774942	9194419	2502
7	Macizo Rocos	145.60	775437	9194064	2450

Los taludes de las estaciones 1, 4, 6 y 7 han sido analizados con el software Dips para hallar la probabilidad de rotura frente a: rotura planar, planar sin límites, en cuña, por volcamiento, y por volcamiento directo. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 32. Resultados del análisis de las estaciones en macizos rocosos, se resalta de amarillo las probabilidades mayores a 0% y menores a 50%, y en rojo las mayores a 50%.

Estación	Tipo de rotura	Probabilidad de rotura (%)
1	Planar	33.33
	Planar Sin Límites	33.33
	En Cuña	25.76
	Por Volcamiento	0
	Por Volcamiento Directo	44.47
4	Planar	0
	Planar Sin Límites	0
	En Cuña	2.78
	Por Volcamiento	0
	Por Volcamiento Directo	33.33
6	Planar	33.33
	Planar Sin Límites	100
	En Cuña	100
	Por Volcamiento	0
	Por Volcamiento Directo	33.33
7	Planar	0
	Planar Sin Límites	0
	En Cuña	33.33
	Por Volcamiento	0
	Por Volcamiento Directo	33.33

De la tabla anterior se deduce que en las estaciones 1, 4 y 7 tienen probabilidades de hasta 33.33% en algún tipo de rotura estudiado, por lo que se debería tener en cuenta la posibilidad de implementar algún método de estabilidad para evitar este tipo de rotura en los taludes. En la estación 6, en dos tipos de rotura se alcanzará la probabilidad de 100% por lo que es completamente necesario implementar métodos de estabilidad para evitar estos tipos de rotura que pueden poner en peligro la integridad de los usuarios de la vía.

#### 4.2. CONTRASTACIÓN CON LA HIPÓTESIS

Las variables condicionantes de la zona, tanto como las características geológicas como geotécnicas de los suelos y macizos rocosos, son muy heterogéneas, generando zonas estables y otras inestables; en la etapa de campo se identificaron 7 zonas potencialmente críticas, donde se realizaron estaciones geotécnicas, se analizaron mediante softwares y se determinó que efectivamente son inestables y requieren medidas de estabilidad que aseguren la integridad de los usuarios de esta importante vía para la ciudad de Cajamarca como para los usuarios de Ciudad De Dios.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

El comportamiento geotécnico de los macizos rocosos y suelos de la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios en el tramo km.142+000 - km.150+000 es compleja por la presencia de rocas altamente fracturadas y por las condiciones físicas y/o mecánicas de los suelos a los cuales se le adhiere el alto ángulo de talud que presentan lo cual genera condiciones inestables en zonas críticas de los taludes.

Las propiedades geotécnicas del macizo rocoso (Resistencia a la compresión simple (MPa), Índice Geológico de Resistencia (GSI)) y las propiedades del suelo de los depósitos cuaternarios (densidad, permeabilidad, peso específico, cohesión y ángulo de fricción) son de mayor influencia para la estimación del factor de seguridad en el cálculo geotécnico de los resultados obtenidos.

El comportamiento geomecánico del macizo rocoso de los taludes de la carretera reporta valores del Índice de Resistencia Geológica (GSI): 53,72, 55 y 75 en los tramos 1, 4,6 y 7 respectivamente. Indicando macizos rocosos de regular calidad y de buena calidad.

Los factores de seguridad de las zonas críticas mediante el software Slide en determinadas condiciones son las que se muestran en el siguiente cuadro:

CONDICIÓN	TRAMO 02	TRAMO 03	TRAMO 05
CONDICIONES NATURALES	1.282	1.101	1.399
SATURACION PARCIAL	1.024	0.756	1.081
SATURACION TOTAL	0.662	0.359	0.530
SISMICIDAD MAXIMA	0.859	0.854	0.993
SIS MAX Y SAT PAR	0.809	0.480	0.727

Las zonas de peligro correspondientes a las áreas críticas por inestabilidad de taludes son; el tramo 06 con progresiva Km.146+200 – Km.146+280 por presentar una probabilidad de 100 % ante una rotura planar sin límites y rotura en cuña, el tramo 02 con progresiva Km. 149+280 – Km.149+330, el tramo 03 con progresiva Km.148+400 – Km.148+600 y el tramo 05 con progresiva Km.146+500 – Km.146+650 por presentar un factor de seguridad menor a lo establecido para poder considerarse estable permanente el cual es un factor mayor o igual a 1.5.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Realizar ensayos de compresión triaxial los cuales fueron limitados por el presupuesto en el presente análisis, para incrementar el conocimiento geotécnico.

Aplicar medidas de estabilización de taludes en las 4 zonas inestables identificadas, como podría ser; por pernos de anclaje en el tramo 06, shotcrete o muro de gaviones en los tramos 02,03 y 05.

Ejecutar periódicamente el mantenimiento de las estructuras de drenajes y taludes por lo menos 2 veces por año, para preservar el adecuado funcionamiento del sistema de drenaje y de esta manera conservar los taludes y pavimento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benavides, V. 1956. Geología de la Región de Cajamarca. Estudio sobre la interpretación geológica y estratigráfica a nivel regional del área de Cajamarca.
- Bieniawski, Z. 1989. Engineering rock mass classifications. John Wiley and Sons.
- Corominas, J. y García Yagüe, A. 2007. Terminología de los movimientos de ladera. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol. 3: 1051-1072
- Cruden, D., 1991. A simple definition of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. No. 43, p. 27-29.
- Dávila, J. 2011, Diccionario Geológico, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima, Perú: Arth Grouting. p.901.
- E. Hoek & E. T. Brown 1997, Estimación de la Resistencia de Macizos Rocosos en la Práctica, Chuquicamata – Chile.
- Gavilanes, H., & Andrade, B. 2007. Introducción a la Ingeniería de Túneles (3rd ed.). (AIME), Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. 2003. Ingeniería Geológica (1st ed.). Madrid, España: Pearson.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, p. 7-29.
- Highland, L., & Jhonson, M. 2004. Landslide Types and Processes.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. 2002. Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. Toronto, Canada.
- Hutchinson J. N. 1968. Mass Movement. Encyclopedia of Geomorphology. Reinhold New York, pp. 688-695.
- Lambe y Whitman 1991. Mecánica de Suelos. Ed Noriega. Pág. 75.

- Marín, P. F. Martín, M. A. Parra 2004, La Linealización del Criterio de Hoek – Brown en el Análisis de la estabilidad General de Taludes en Roca.
- Marinos, P. G., Marinos, V., & Hoek, E. 2007. The Geological Strength Index (GSI): A characterization Tool for Assessing Engineering Properties for Rock Masses. In Underground works under special conditions (Romana, Pe, pp. 13–21). Taylor and Francis.
- Montoya, F. 2014. Evaluación Geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca – El Gavilán. Tesis de pregrado Universidad Nacional de Cajamarca. 151 p.
- Ramirez, P., & Alejano, L. 2004. Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes (1st ed.). Madrid, España: E.T.S.I Minas (UPM).
- Reyes, L. 1980. Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba (1st ed.). Lima, Perú: INGEMMET.
- Suárez, J. 2007. Deslizamientos - Análisis Geotécnico (1st ed.). Bogota, Colombia: Erosion.com.
- Vallejos, et al 2013. Application of the Synthetic Rock Mass approach to characterize rock mass behavior at the El Teniente Mine, Chile. In 3rd International FLAC / DEM Symposium, At Hangzhou, China. Paper 7-2 (p. 15). Hangzhou, China.
- Varnes, D. 1978. Slope Movement: Types and Proceses. In Scuster & Krizek, 1978: Landslides: Analysis and Control. Special report 176. Transportation Research Board, Comisión on Sociotechnical Systems, National Research Council. National Academy of Sciences, Washington, D.C. 234 p.p.
- Villota, H. 2005. Geomorfología Aplicada a Levantamientos Edafológicos y Zonificación Física de Tierras (2nd ed.). Bogota, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Wu T.H. (1996), Soil strength properties and theris measurement. Landslides Investigation and mitigation Special Report 247 Transportation research Board, pp.319- 336. Washington
- Zavala, B., & Rosado, M. 2011. Riesgo Geológico en la Región Cajamarca. Lima, Perú.

## **ANEXOS**

- A. REGISTROS GEOLÓGICOS – GEOTECNICOS.
- B. ANALISIS DEL PERFILES MEDIANTE EL SOFTWARE SLIDE.
- C. PLANOS.