

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA/ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS DE  
ESTABILIDAD DEL TALUD AFLORANTE EN EL SECTOR TRONADORA, VÍA  
CALIFORNIA- LA BAJA. MUNICIPIO DE CALIFORNIA, SANTANDER.**

**ANDRÉS FELIPE OSORIO VILLAMIZAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA, SANTANDER**

**2017**

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA/ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD AFLORANTE EN EL SECTOR TRONADORA, VÍA CALIFORNIA- LA BAJA. MUNICIPIO DE CALIFORNIA, SANTANDER.**

**ANDRÉS FELIPE OSORIO VILLAMIZAR**

**MODALIDAD PRÁCTICA EMPRESARIAL**

**Trabajo de grado para optar al título de Geólogo**

**Director**

**GUILLERMO VARGAS PIESCHACÓN**

**Geólogo Especialista en Geotecnia Ambiental**

**Tutor de la práctica**

**ALFONSO PALACIO CASTILLA**

**Geólogo Geomecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA, SANTANDER**

**2017**

## DEDICATORIA

A Dios por permitirme cumplir con esta meta de mi vida.

A mi Padre, Raúl que con tu confianza, apoyo fundamental y esfuerzo lograste que me formara como profesional.

A mi grandiosa madre Magdalena, que siempre me apoyaste incondicionalmente. Mamá gracias por tu paciencia, amor, tu comprensión y tus oraciones que contribuyeron a alcanzar esta meta.

A mi familia entera, quienes han sido el motor de mi vida y con los que he compartido los mejores momentos, cada uno de ellos que me han brindado apoyo y cariño en toda mi vida. Infinitas gracias.

A mis compañeros de la universidad, quienes me brindaron su grata amistad y espero poder seguir compartiendo con ellos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por bendecirme con salud, sabiduría y la fortaleza necesaria para afrontar los duros momentos, a Él agradezco este triunfo.

A mis queridos padres por brindarme el apoyo incondicional y haberme dado la oportunidad de estudiar y adentrarme en esta gran ciencia como lo es la geología. Al resto de mi familia de quienes he recibido apoyo y gran cariño.

Mi sincero agradecimiento a la empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S por haberme acogido y darme la oportunidad de realizar la práctica empresarial para mi proyecto de grado. Especialmente agradezco a toda el área de geología por su mejor buena disposición a la hora de colaborar y asesorarme.

Al geólogo Alfonso Palacio, mi tutor y codirector, por su acompañamiento, colaboración y asesoría que contribuyeron a realizar la propuesta de trabajo, ejecutarla y cumplir con los objetivos propuestos.

A mi director de proyecto, el profesor Guillermo Vargas quien amablemente depositó su confianza y asesoría para la elaboración de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, principalmente la Escuela de Geología y su excelente equipo de profesores que mediante sus conocimientos y experiencias fueron fundamentales para mi aprendizaje y formación como un futuro profesional para contribuir al desarrollo de este país.

Un agradecimiento muy especial a muchos de mis compañeros de geología quienes estuvieron conmigo durante estos años en formación y siempre me brindaron su ayuda. A Efraín, Grau, Omar, Sebastián, Nicolás, Cesar, Diego, Iván, Laura, María Eugenia, Dayana y todos aquellos con los compartí buenos y malos momentos.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	19
1. JUSTIFICACIÓN .....	21
2. OBJETIVOS.....	22
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	22
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3. METODOLOGÍA .....	23
3.1. FASE 1: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CAPACITACIÓN.....	23
3.2. FASE 2: TRABAJO DE CAMPO .....	23
3.3. FASE 3: TRABAJO DE LABORATORIO .....	24
3.4. FASE 4: TRABAJO DE OFICINA.....	24
4. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	25
4.1. LOCALIZACIÓN .....	25
4.2. VÍAS DE ACCESO .....	26
4.3. FISIOGRAFÍA Y CLIMA.....	27
4.4. HIDROGRAFÍA.....	28
5. MARCO GEOLÓGICO .....	29
5.1. GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL .....	29
5.2. TECTÓNICA REGIONAL Y LOCAL.....	31
6. MARCO TEÓRICO.....	34

6.1.	MACIZO ROCOSO .....	34
6.2.	MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO .....	34
6.2.1.	RMR- Bieniawski (1976).....	35
6.2.2.	Q - Barton (1974) .....	38
6.2.3.	GSI – Hoek (1994) .....	45
6.3.	CÁLCULOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS.....	48
6.3.1.	MÉTODOS DEL CÁLCULO EN DEFORMACIONES. ....	49
6.3.2.	MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE .....	49
6.4.	MODELOS DE FALLA DE TALUD .....	51
6.4.1.	FALLAS CON CONTROL ESTRUCTURAL.....	52
6.4.2.	FALLAS SIN CONTROL ESTRUCTURAL .....	54
6.5.	OBRAS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES .....	56
6.5.1.	PERNOS DE ANCLAJE: .....	56
6.5.2.	ANCLAJES TENSIONADOS.....	58
6.5.3.	HORMIGÓN PROYECTADO .....	58
7.	SOFTWARES EMPLEADOS .....	60
7.1.	GENERALIDADES DEL SOFTWARE DIPS ROCSCIENCE .....	60
7.2.	GENERALIDADES DEL SOFTWARE SLIDE ROCSCIENCE.....	61
7.3.	GENERALIDADES DEL SOFTWARE SWEDGE ROCSCIENCE .....	62
8.	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO .....	64
8.1.	ZONIFICACION GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO .....	64
8.2.	MAPEO GEOTÉCNICO.....	64
8.3.	ORIENTACIÓN DE LAS FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES .....	75
8.4.	ENSAYOS DE CARGA PUNTUAL (PLT) .....	76

9.	EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD POR MODELAMIENTO .....	83
9.1.	MODELAMIENTO CON EL SOFTWARE SLIDE .....	83
9.1.1.	DETERMINACIÓN DE LOS SECCIONES ANALIZAR. ....	83
9.1.2.	PROCESAMIENTO DE LOS DATOS PARA ANALISIS DE ESTABILIDAD EN SLIDE .....	85
9.1.3.	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS SLIDE Y DISCUSIÓN .....	87
9.2.	MODELAMIENTO CON EL SOFTWARE SWEDGE .....	89
9.2.1.	DETERMINACIÓN DE LOS SECCIONES ANALIZAR .....	89
9.2.2.	IDENTIFICACIÓN DE CUÑAS CON EL SOFTWARE DIPS.....	91
9.2.3.	PROCESAMIENTO DE LOS DATOS PARA ANALISIS DE ESTABILIDAD EN SWEDGE .....	100
9.2.4.	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS SWEDGE Y DISCUSIÓN .....	101
10.	ESTABILIZACION DE CUÑAS INESTABLES.....	106
11.	CONCLUSIONES .....	110
12.	RECOMENDACIONES .....	112
	BIBLIOGRAFÍA.....	114
	ANEXOS .....	118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del municipio de California, Santander. ....	25
Figura 2. Localización de la zona de estudio. ....	26
Figura 3. Geología de la zona de estudio. ....	31
Figura 4. Esquema estructural de Santander. ....	32
Figura 5. Ejemplo para calcular el RQD. ....	36
Figura 6. Esquema métodos de cálculo para estabilidad de taludes. ....	48
Figura 7. Falla Tipo Planar. ....	52
Figura 8. Falla Tipo Cuñas. ....	53
Figura 9. Falla por volcamientos. ....	54
Figura 10. Falla Circular. ....	55
Figura 11. Gráfica de análisis estadístico para la calificación GSI de los tramos mapeados. ....	70
Figura 12. Gráfica de análisis estadístico para la calificación RMR de los tramos mapeados. ....	72
Figura 13. Gráfica de análisis estadístico para la calificación Q de los tramos mapeados. ....	74
Figura 14. Modos típicos de fallo para muestras válidas e inválidas. ....	77
Figura 15. Gráfica de análisis estadístico de los valores UCS en las muestras de roca intacta. ....	82
Figura 16. Ubicación y disposiciones de las secciones de análisis Slide. ....	84
Figura 17. Gráfica de análisis del Factor de Seguridad en las tres condiciones: Normal, Saturada y Sísmica. ....	88

Figura 18. Formación de una cuña en la proyección estereográfica. ....	92
Figura 19. Gráfico estadístico del peso de las cuñas. ....	102
Figura 20. Gráfica estadística del factor de seguridad de las cuñas en Condiciones Normales. ....	103
Figura 21. Gráfica estadística del factor de seguridad de las cuñas en Condiciones Sísmicas.....	104
Figura 22. Gráfica comparativa del Factor de seguridad de cuñas antes y después de su estabilización en condiciones normales. ....	108
Figura 23. Gráfica comparativa del Factor de seguridad de cuñas antes y después de su estabilización en condiciones sísmicas. ....	109

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de valoración para los parámetros de clasificación RMR. ....	37
Tabla 2. Clasificación del macizo rocoso según el índice RMR. ....	37
Tabla 3. Índice de familia de diaclasas. ....	38
Tabla 4. Índice de rugosidad de las fracturas.....	39
Tabla 5. Índice de alteración de las discontinuidades. ....	41
Tabla 6. Factor de reducción de agua.....	42
Tabla 7. Factor de reducción de esfuerzos. ....	43
Tabla 8. Clasificación del macizo rocoso según el índice Q.....	44
Tabla 9. Caracterización geotécnica del macizo rocoso según el grado de trabazón de los bloques o trozos de roca y la condición de las discontinuidades. ....	46
Tabla 10. Estimación del Índice Geológico de resistencia, GSI, en base a una Descripción Geológica del Macizo Rcoso. ....	47
Tabla 11. Clasificación GSI para los tramos mapeados.....	71
Tabla 12. Clasificación RMR para los tramos mapeados.....	73
Tabla 13. Clasificación RMR para los tramos mapeados.....	75
Tabla 14. Tabla de los datos estructurales tomados en el mapeo geotécnico. ....	76
Tabla 15. Resultados de las pruebas de Ensayos de Carga Puntual.....	78
Tabla 16. Resultados UCS calculados por el archivo Excel.....	81
Tabla 17. Distribución de las secciones de análisis de Slide a lo largo de los tramos mapeados. ....	85
Tabla 18. Tabla donde se relacionan los tramos mapeados con las Secciones de análisis en Slide y Swedge. ....	89

Tabla 19. Datos del talud para cada sección. ....	92
Tabla 20. Cuñas identificadas en la sección A con el software DIPS. ....	93
Tabla 21. Cuñas identificadas en la sección BC con el software DIPS. ....	94
Tabla 22. Cuñas identificadas en la sección BC con el software DIPS. ....	95
Tabla 23. Cuñas identificadas en la sección DE con el software DIPS. ....	96
Tabla 24. Cuñas identificadas en la sección EF con el software DIPS. ....	99
Tabla 25. Valores de cohesión, ángulo de fricción y peso unitario. ....	101
Tabla 26. Cuñas Inestables. ....	105
Tabla 27. Factor de seguridad de las cuñas antes y después de su estabilización. .....	106

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Fisiografía de la zona de estudio. ....	28
Fotografía 2. Pernos de Anclaje.....	57
Fotografía 3. Hormigón proyectado. ....	59
Fotografía 4. Panorámica del Tramo $\Delta 1-\Delta 2$ .....	65
Fotografía 5. Panorámica del Tramo $\Delta 2-\Delta 3$ .....	66
Fotografía 6. Panorámica del Tramo $\Delta 3-\Delta 4$ .....	66
Fotografía 7. Panorámica del Tramo $\Delta 4-\Delta 5$ .....	67
Fotografía 8. Panorámica del Tramo $\Delta 5-\Delta 6$ .....	67
Fotografía 9. Panorámica del Tramo $\Delta 6-\Delta 7$ .....	68
Fotografía 10. Panorámica del Tramo $\Delta 7-\Delta 8$ .....	68
Fotografía 11. Panorámica del Tramo $\Delta 8-\Delta 9$ .....	69
Fotografía 12. Panorámica del Tramo $\Delta 9-\Delta 10$ .....	69
Fotografía 13. Afloramiento del talud estudiado.....	91

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: MAPEOS GEOTÉCNICOS .....	118
ANEXO B: ORIENTACIONES DE LAS FAMILIAS DE LAS DISCONTINUIDADES .....	128
ANEXO C: TABLA DE EXCEL DE ENSAYOS DE CARGA PUNTUAL PARA CÁLCULO DE UCS .....	132
ANEXO D: MODELAMIENTO CON EL SOFTWARE SLIDE .....	133
ANEXO E: IDENTIFICACIÓN DE CUÑAS CON EL SOFTWARE DIPS.....	145
ANEXO F: MODELAMIENTO CON EL SOFTWARE SWEDGE .....	148
ANEXO G: ESTABILIZACIÓN DE CUÑAS CON PERNOS DE ANCLAJE CON EL SOFTWARE SWEDGE.....	170

## RESUMEN

**TÍTULO:** CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA/ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD AFLORANTE EN EL SECTOR TRONADORA, VÍA CALIFORNIA- LA BAJA. MUNICIPIO DE CALIFORNIA, SANTANDER.\*

**AUTOR:** ANDRÉS FELIPE OSORIO VILLAMIZAR \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Geotecnia, Macizo rocoso, Talud, Estabilidad de talud, Clasificación geomecánica, Factor de seguridad.

### DESCRIPCIÓN:

La vía California – La Baja en el Municipio de California, Santander; presenta en varios sectores taludes de alta pendiente con alto grado de fracturamiento que han provocado deslizamientos y caídas de bloques de rocas años atrás. Dichos fenómenos ha traído como consecuencia pérdidas económicas, la incomunicación con la zona minera del municipio y con las veredas La Baja y Angosturas, incluso esto representa un riesgo para la comunidad donde ya ha cobrado vidas en el pasado. Por lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de realizar el presente proyecto de grado en la modalidad práctica empresarial en la empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S, donde se llevó a cabo el proceso de caracterización geotécnica y análisis de estabilidad para el talud ubicado en el sector Tronadora.

Este estudio consta de cuatro etapas, en la primera se realiza una recopilación bibliográfica de la zona y el tema de estudio, también incluye una capacitación en geotecnia para el reconocimiento de parámetros geotécnicos; la segunda es la etapa de campo donde se hace el registro de los parámetros por medios de mapeos geotécnicos para la caracterización del macizo rocoso. En la tercera etapa, las muestras de roca intacta son llevadas al laboratorio para realizarles ensayos de carga puntual para determinar las propiedades mecánicas de la roca. Y en la cuarta etapa consiste en los trabajos de oficina, con la información recogida en las etapas anteriores se emplean los softwares Dips, Slide, Swedge de Rocscience para los análisis y modelamientos del talud, de esta forma se determina las zonas de mayor riesgo de inestabilidad y se propone adicionar pernos de anclaje para la estabilización del talud. Posteriormente se presentan las conclusiones y recomendaciones de este estudio.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Guillermo Vargas Pieschacón, Geólogo y Especialista en Geotecnia Ambiental. Tutor: Alfonso Palacio Castilla, Geólogo Geomecánico.

## ABSTRACT

**TITLE:** GEOTECHNICAL / STRUCTURAL CHARACTERIZATION AND ANALYSIS OF STABILITY OF TALUD AFLORANTE IN THE SECTOR TRONADORA VIA CALIFORNIA- LA BAJA. MUNICIPALITY OF CALIFORNIA, SANTANDER.\*

**AUTHOR:** ANDRÉS FELIPE OSORIO VILLAMIZAR.\*\*

**KEYWORDS:** Geotechny, Rock mass, Slope, Slope stability, Geomechanical classification, Safety factor.

### DESCRIPTION:

The California - Baja route in the Municipality of California, Santander; It presents in several sectors slopes of high slope with a high degree of fracturing that have caused landslides and falls of rock blocks years ago. These phenomena have resulted in economic losses, the lack of communication with the mining area of the municipality and the trails of La Baja and Angosturas, even this represents a risk to the community where it has already claimed lives in the past. Due to the foregoing, there is a need to carry out the present project of a degree in the practical business modality in Sociedad Minera de Santander SAS, where the process of geotechnical characterization and stability analysis for the slope located in the sector was carried out Tronadora.

This study consists of four stages, in the first a bibliographic compilation of the zone and the subject of study is carried out, it also includes a geotechnical training for the recognition of geotechnical parameters; the second is the field stage where the parameters are recorded by means of geotechnical maps for the characterization of the rock mass. In the third stage, intact rock samples are taken to the laboratory for spot load tests to determine the mechanical properties of the rock. And in the fourth stage consists of office work, with the information collected in the previous stages, the software Dips, Slide, Swedge of Rocscience is used for the analysis and modeling of the slope, in this way the areas of greatest risk of instability and it is proposed to add anchor bolts for the stabilization of the slope. Subsequently, the conclusions and recommendations of this study are presented.

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Guillermo Vargas Pieschacón, Geologist and Environmental Geotechnical Specialist. Tutor: Alfonso Palacio Castilla, Geologist Geomechanical.

## INTRODUCCIÓN

El departamento de Santander se encuentra en constante riesgo de deslizamientos por inestabilidad en taludes; esto debido diferentes factores como al relieve montañoso, las fuertes precipitaciones, formaciones geológicas, meteorización y la sismicidad que existe en esta zona. Estos deslizamientos producen daños en la infraestructura vial, la propiedad privada e incluso hasta pueden causar la muerte a los habitantes que residen cerca.

De esta forma la naturaleza es como pone a prueba nuestros conocimientos y nos obliga a crear soluciones eficaces para prevenir y mitigar estos desastres naturales, de aquí es donde surge la importancia del estudio de estabilidad de taludes, para poder encontrar métodos de estabilización, sugerir medidas de control y ejecutar obras civiles para el sostenimiento del talud.

El Municipio de California, Santander no ha sido ajeno a estos fenómenos de deslizamientos, que en el pasado ha generado grandes pérdidas económicas e incluso ha cobrado vidas. California se ha caracterizado por ser municipio minero desde hace aproximadamente 500 años, por lo cual su economía mayoritariamente se rige en torno a esta actividad, lo que genera grandes ingresos económicos no solo a este municipio sino a sus municipios vecinos, por lo que se requiere de vías óptimas para satisfacer la movilidad de sus habitantes y por ende comunicación con el resto de la región.

En el sector Tronadora ubicado en la vía California y la vereda La Baja, es uno de los tramos más críticos, donde se presentan taludes de alta pendiente con gran fracturamiento de los bloques de rocas y los factores climatológicos hacen que aumente la meteorización de las rocas. Esto ha provocado el desprendimiento de grandes bloques que generan grandes riesgos para la comunidad.

Es por esto que surgió la necesidad de elaborar el presente trabajo con la modalidad de práctica empresarial en la empresa SOCIEDAD MINERA DE SANTANDER S.A.S, en el que se tuvo como objetivo principal elaborar un análisis de estabilidad del talud en el sector Tronadora, para posteriormente proponer medidas para la estabilización del talud. Todo esto se hizo mediante trabajos de campo, ensayos de laboratorio, y programas de análisis técnico para evaluar la estabilidad del talud.

Como compromiso social hacia la comunidad californiana la empresa MINESA S.A.S con la elaboración de este trabajo pretende promover el crecimiento económico, teniendo en cuenta que este es un importante tramo de la vía ya que comunica hacia la parte minera del municipio, con el sitio turístico conocido como el Pocito de San Antonio, con las veredas La Baja, y Angosturas, y parte de este tramo estudiado también comprende la conexión vial entre California y Vetás. Con la ejecución de este proyecto se genera un impacto social positivo a aproximadamente 500 habitantes que dependen diariamente de esta vía.

## 1. JUSTIFICACIÓN

La vía California – La Baja en el Departamento de Santander, presenta varios sectores en lo que se ha observado colapsos de talud y caídas de roca que han interrumpido el flujo de tráfico de la zona en el pasado y puesto en riesgo a las personas que transitan por esta. El sector Tronadora es uno de los más críticos dadas sus características geológico/estructurales de roca fracturada, taludes de pendiente pronunciada y filtraciones de agua, que han causado remoción de bloques en el pasado.

Por lo mencionado anteriormente es de gran importancia la elaboración de este proyecto, en donde será necesario llevar a cabo un proceso de caracterización geotécnica del macizo rocoso, con la toma de datos de campo teniendo en cuenta las propuestas desarrolladas por Hoek (1988, actualizado en 1994), conocida como Índice Geológico de Resistencia o índice GSI, por Bieniawski (1976, actualizado en 1989), conocida como Rock Mass Rating o el índice RMR y por Barton(1974, actualizado en 1994) conocido como el Índice Q de calidad de roca para túneles, a su vez se realizaran ensayos de laboratorio en muestras de rocas, y posteriormente con ayuda de programas computacionales evaluar la estabilidad del talud, determinar su factor de seguridad y recomendar medidas de monitoreo y control si son necesarias.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la estabilidad del talud rocoso aflorante en la vía del sector Tronadora y proponer medidas de monitoreo, control o modificación que apliquen.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la calidad geomecánica del macizo rocoso, basado en los índices RMR (Rock mass ratio), Q de Barton y GSI (Geological Strength Index)
- Identificar los parámetros y factores que alteran la estabilidad del talud.
- Realizar ensayos de laboratorio para determinar las propiedades geomecánicas de las muestras de roca.
- Realizar el análisis estático y pseudoestático del talud usando el método de equilibrio límite en el software Slide de RocScience
- Realizar el análisis de estabilidad de cuñas superficiales de roca usando la teoría de bloques en el software SWedge de RocScience
- Proponer las medidas de monitoreo o control para el sostenimiento y estabilidad del talud rocoso.

### **3. METODOLOGÍA**

Este proyecto se realizó con una metodología sencilla pero que requirió de gran cuidado para obtener los resultados lo más razonables posibles. Para la caracterización del macizo rocoso, se implementó las propuestas hechas por Bieniawski (1979), Barton (1974), Hoek (1994) para obtener los índices RMR, Q y GSI respectivamente, esto requirió de una capacitación preliminar para lograr una buena descripción de los parámetros básicos en campo, una recolección de muestras representativas para ser estudiadas en el laboratorio, posteriormente el trabajo de oficina donde se empleó el uso de programas computacionales para hacer el respectivo análisis y por último hacer la elaboración del presente informe final donde se exponen los resultados y conclusiones. Con base en estas propuestas se cumplió la siguiente metodología:

#### **3.1. FASE 1: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CAPACITACIÓN**

Esta fase consistió en la recolección y revisión de información como trabajos inéditos, tesis bibliográficas, datos suministrados por MINESA y estudios geotécnicos disponibles para caracterización y análisis de taludes. Por otra parte se hizo la capacitación para reconocer los parámetros del macizo en campo. También se hizo la adquisición y manejo de los softwares Slide, Dips y Swedge de Rocscience.

#### **3.2. FASE 2: TRABAJO DE CAMPO**

Se hizo reconocimiento de la zona de estudio, para esto fue necesario el uso de instrumentos como la brújula, GPS, martillo geológico, metro. Con base en las observaciones geotécnicas se fijaron los puntos de referencia para definir los tramos a estudiar. Una vez definidos estos tramos del talud se procedió a realizar

los mapeos empleando las propuestas de caracterización geotécnica de Bieniawski (RMR), Barton (Q) y Hoek(GSI). Para esta labor fue necesario hacer un buen registro de cada uno de los parámetros de las discontinuidades, donde se registraron en el formato de Mapeo Geotécnico suministrado por MINESA. Posteriormente se recolectaron muestras de roca de cada uno de los tramos mapeados para realizarles los ensayos de laboratorio.

### **3.3. FASE 3: TRABAJO DE LABORATORIO**

Con las muestras de roca intacta recolectadas en campo, se realizaron Ensayos de Carga Puntual (PLT) en el laboratorio, para determinar el fallo que sufre cada muestra y de esta forma tener más información sobre las propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta.

### **3.4. FASE 4: TRABAJO DE OFICINA**

Con los diferentes datos recogidos en las etapas anteriores, se hizo una revisión de estos para corroborar valores que puedan ser anómalos. Posteriormente con esta información se representaron los datos con el software Dips y realizaron los respectivos modelamientos de análisis de estabilidad para determinar el factor de seguridad para cada perfil con el manejo óptimo de los softwares Slide y Swedge.

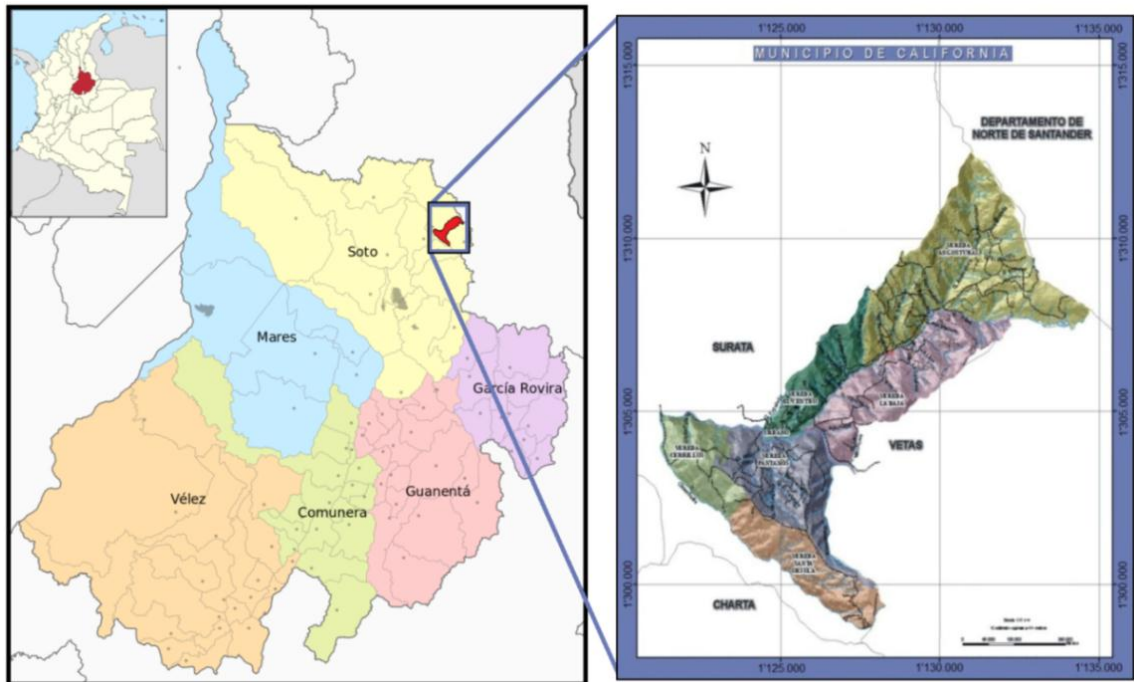
Por último se elaboró el presente informe final con los resultados definitivos y haciendo sugerencia de medidas de sostenimiento para alcanzar la estabilidad.

## 4. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 4.1. LOCALIZACIÓN

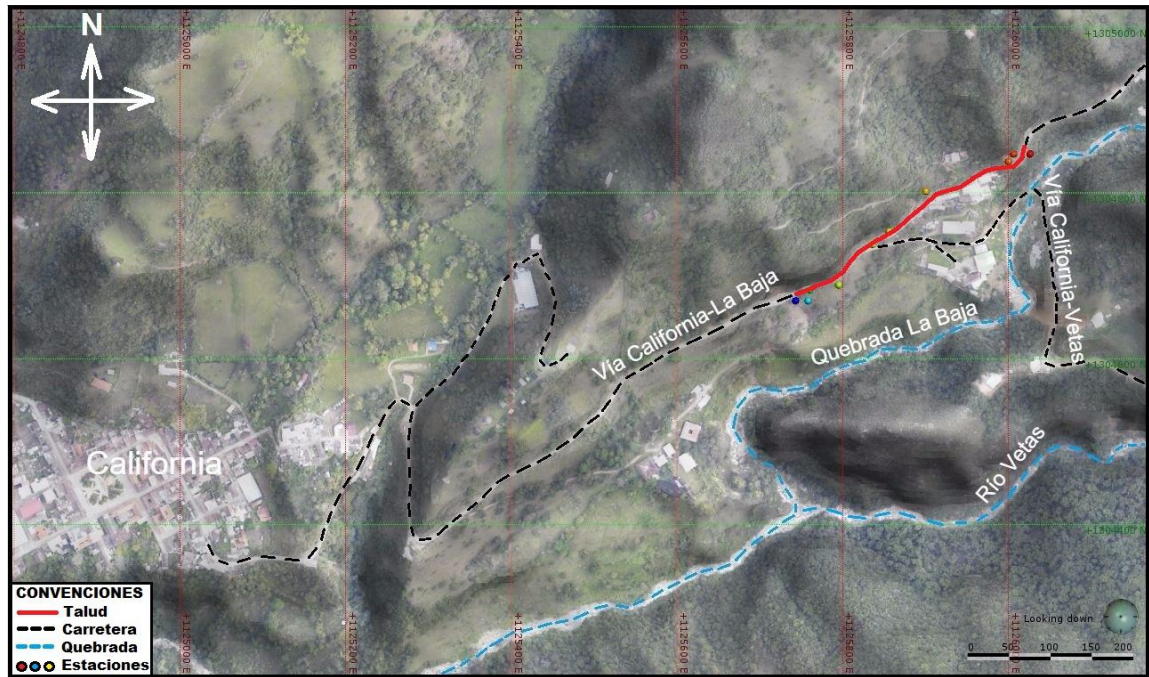
La zona de estudio se encuentra ubicada en Santander en la Provincia de Soto, en el municipio de California a 55Km aproximadamente al NE de la ciudad de Bucaramanga (*Figura 1*). El Talud estudiado se encuentra a 2 Km aproximadamente del casco urbano del municipio de California en la sector Tronadora (*Figura 2*), al margen izquierdo de la vía carretable de California-La Baja.

*Figura 1. Localización del municipio de California, Santander.*



*Fuente: Página Web Alcaldía de California. Modificado por el autor.*

**Figura 2.** Localización de la zona de estudio.



Fuente: MINESA S.A.S. Modificado por el autor.

## 4.2. VÍAS DE ACCESO

La principal vía de acceso a la zona de estudio, inicia en el norte de Bucaramanga dirigiéndose a Matanza, siguiendo por Suratá y California. Llegando a este último municipio se avanza 2 km más hacia la vereda La Baja. La vía comprende una distancia de 52 km, se encuentra pavimentada en un 60%, y un 40% sin pavimentar en estado regular. El recorrido de este acceso consta de 2 horas y 30 minutos de duración.

La zona cuenta con otro acceso secundario por la vía Vetas-California. Este acceso inicia en Bucaramanga con vía pavimentada hacia al casco urbano de Berlín, de aquí se toma la vía sin pavimentar hacia Vetas y luego hasta California,

en donde la zona se encuentra 2 km antes de llegar a este último municipio. La vía Vetas-California se encuentra sin pavimentar y presenta escarpes pronunciados con algunos tramos de banca angosta. El recorrido de este acceso secundario consta de 3 horas y 30 minutos de duración.

### **4.3. FISIOGRAFÍA Y CLIMA**

La zona está dominada por un relieve montañoso, en el que se presentan pendientes abruptas y valles profundos, estos rasgos hacen que el drenaje sea principalmente paralelo controlado por la actividad estructural, la altura a la que se ubica el talud sobre el nivel del mar es de 2100 m aproximadamente.

El clima es templado a frío, la temperatura promedio es de 17°C y oscila entre 13° y 20°C<sup>1</sup>. En el año se presentan dos estaciones lluviosas, una desde Abril hasta Mayo y la otra desde Octubre hasta Noviembre. El promedio anual de precipitaciones es cerca de 1.500 a 2.000 milímetros. La vegetación está dominada por árboles y plantas de menor tamaño.

---

<sup>1</sup>ALCALDÍA DE CALIFORNIA, Disponible en: [http://www.california-santander.gov.co/informacion\\_general.shtml#ecologia](http://www.california-santander.gov.co/informacion_general.shtml#ecologia). 2017.

**Fotografía 1.** *Fisiografía de la zona de estudio.*



#### **4.4. HIDROGRAFÍA**

La red hidrográfica de la zona de estudio pertenece a la cuenca del río Lebrija, sub cuenca del río Suratá, micro cuenca del río Vetás y cuyos principales drenajes que aportan son: quebrada la Baja, quebrada Mata Perros, quebrada La Laguna, quebrada La Venta, quebrada el Indio, y quebrada Chumbula.

La quebrada La Baja nace en la vereda Angosturas de la intersección de las quebradas Angosturas y Páez, con 5.5Km de recorrido, presentando como tributarios principales las quebradas Aserradero, Las Animas, Santa Catalina, San Antonio, San Juan, la Higuera, Agua Limpia y otras de las cuales se toman sus aguas para abastecer los acueductos de las veredas presentes en su recorrido. La quebrada sigue una dirección aproximada S50°W, hasta la confluencia con el Río Vetás. La quebrada La Baja presenta en promedio caudales que varían entre 0.7 y 1.8m<sup>3</sup>/seg.

## 5. MARCO GEOLÓGICO

### 5.1. GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL

El área de estudio se encuentra en el Distrito Minero de Vetas y California (DMVC) ubicado al nororiente de la Cordillera Oriental de Colombia. Para Mendoza y Jaramillo<sup>2</sup>, el distrito minero de Vetas-California forma parte del Macizo de Santander. Este Macizo está compuesto por rocas metamórficas de la Formación Neis de Bucaramanga, Silgará y el Ortoneis, de edades Mesoproterozoico a Paleozoico Inferior, rocas ígneas Mesozoicas y rocas sedimentarias Paleozoicas y Cenozoicas<sup>3</sup>. El Neis de Bucaramanga es un paraneis del Mesoproterozoico que se compone de rocas afectadas por metamorfismo regional de alto grado, esta formación consta de rocas pelíticas (neises biotíticos y silimaníticos), rocas máficas (neises horbléndicos y anfibolitas), rocas cuarzofeldespáticas (neis y cuarcitas) y rocas carbonatadas (mármoles). La Formación Silgará consiste en filitas, cuarcitas, mármoles y esquistos pelíticos (micáceos, granatíferos, estaurolíticos, andalusíticos, cianíticos y silimaníticos), rocas calcosilicatadas. El Ortoneis es de composición tonalítica, granítica a granodiorítica. Estas rocas del Ortoneis presentan contactos intrusivos con el Neis de Bucaramanga y la Formación Silgará. El complejo metamórfico está intruido por rocas ígneas del Cenozoico de composición variable (tonalita, dacita, andesita, granodiorita y diorita). La geometría y tamaño de estos cuerpos es variable, según relaciones estructurales y de alteración observadas en el distrito, pueden o no tener relación directa con la mineralización.

---

<sup>2</sup> MENDOZA, H. y JARAMILLO, L. Geología y Geoquímica del Área de California, Santander. Boletín de Geológico. INGEOMINAS, 1973. volumen 22, No. 2.

<sup>3</sup> WARD, D.E. Memoria Explicativa: Cuadrángulos H-13 Pamplona. INGEOMINAS, 1973. 144 p.

Al oeste de California aflora la unidad Cretácica de rocas sedimentarias subyaciendo a las rocas más antiguas del basamento, correlacionado con el evento de deformación andina, correspondiente a una secuencia marina transgresiva formada por limonitas negras, blandas y duras localmente calcáreas, calizas, hacia la parte superior ocurren mantos de carbón, conglomerados y areniscas aparecen hacia la parte inferior.

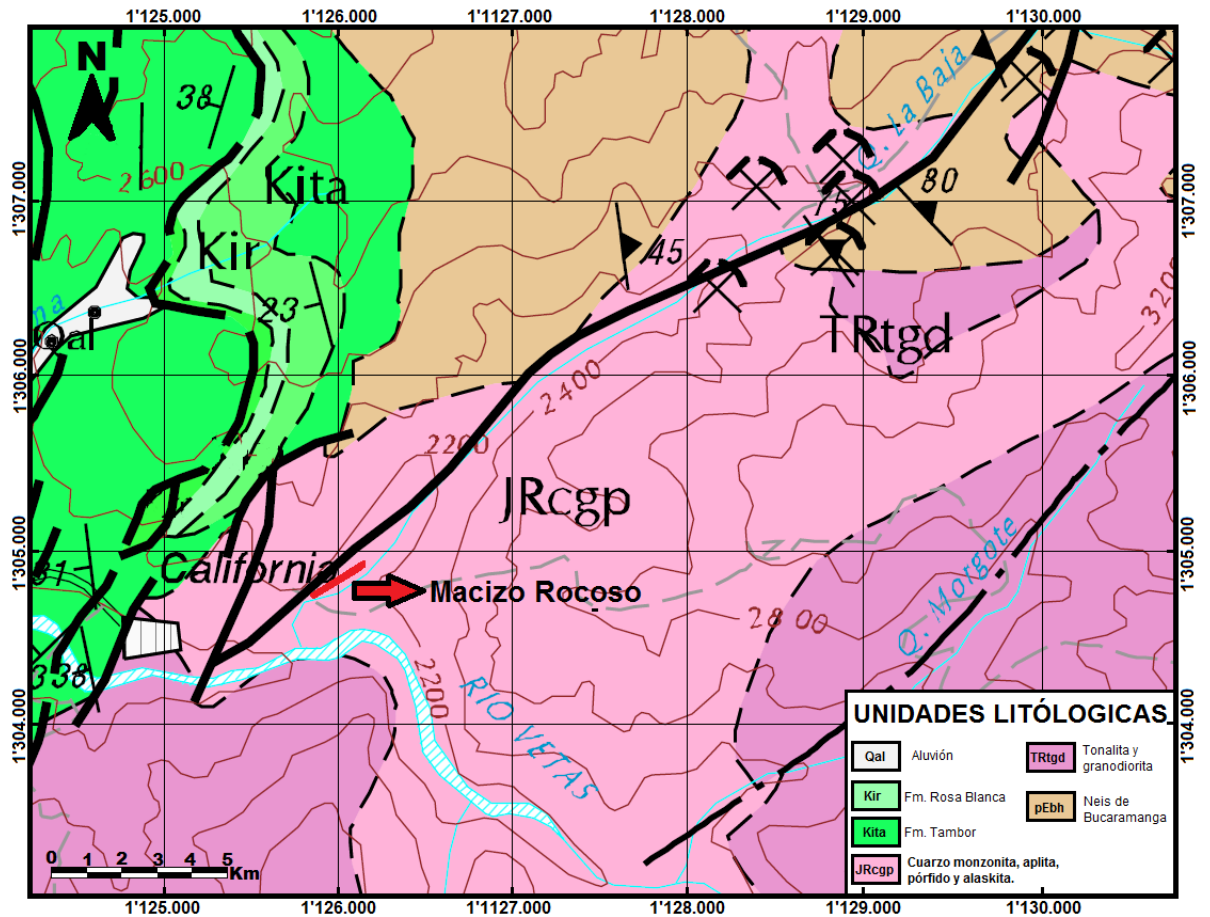
Para el sector de Tronadora, donde se localiza el talud trabajado (*Figura 3*), se presentan rocas intrusivas del Triásico (JRcgp). Estas rocas intrusivas comprenden Cuarzomonzonita, aplita y pórfido que forman un stock compuesto hacia el Norte de California<sup>4</sup>. Las rocas aflorantes se componen de granito o cuarzomonzonita rosado pálido a blanco (alaskitas), de grano fino a medio, estas rocas presentan plagioclasa, feldespato potásico, muscovita, biotita, con fenocristales o venillas de cuarzo. Gran parte de la roca de esta área ha sido extensamente fracturada, lixiviada e impregnada con sílice y sulfuros, principalmente pirita aurífera<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> WARD, D.E. Memoria Explicativa: Cuadrángulos H-13 Pamplona. INGEOMINAS, 1973. 144 p.

<sup>5</sup> MANTILLA, L. Nuevas evidencias sobre el magmatismo miocénico en el distrito minero de Vetás-California .2011

**Figura 3. Geología de la zona de estudio.**



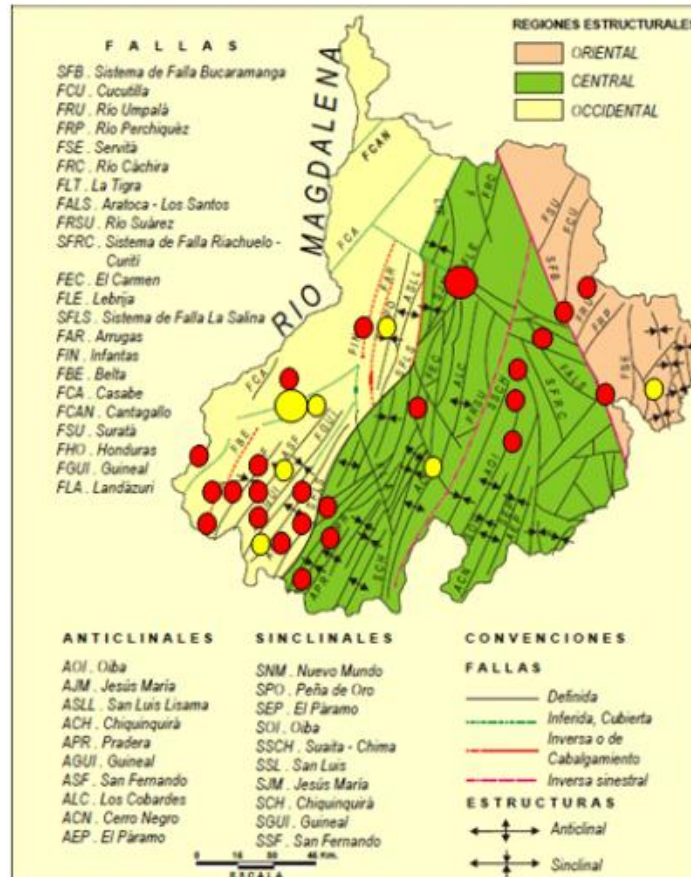
Fuente: Geología del cuadrángulo H13 Pamplona, INGEOMINAS. Modificado por el autor.

## 5.2. TECTÓNICA REGIONAL Y LOCAL

El rasgo estructural más importante y considerable en el territorio del DMVC es el sistema de fallas de Bucaramanga-Santa Marta, este sistema de fallas cruza la región centro-oriental del Departamento de Santander (Figura 4). Es considerada un sistema de fallas de rumbo (Clavijo, 1994) con movimiento sinistral. Tiene una

componente vertical importante que hace que esta falla se comporte en algunos sectores como inversa.<sup>6</sup>

**Figura 4.** Esquema estructural de Santander.



Fuente: <https://geologiambiental.es.tl/REGISTRO-SISMOLOGICO-.htm>

La falla de Suratá presenta un rumbo predominante N51°E, y su trazo sigue el curso del Río Suratá. Esta falla actualmente es inversa y también tiene desplazamiento de rumbo dextral y afecta la falla Bucaramanga, en unos 750 m, al norte de Bucaramanga.

<sup>6</sup> WARD, D.E. Memoria Explicativa: Cuadrángulos H-13 Pamplona. INGEOMINAS, 1973. 144 p.

Otras fallas con rumbo NE han sido identificadas entre las que está el sistema de falla Romeral-Cucutilla y el sistema de La Baja-Angosturas, estos dos haciendo parte del sistema regional de fallas de Boconó (Hornes, 2005).

Las fallas de Cucutilla y Surata de edad Mesozoica fueron reactivadas durante la orogenia Andina formando nuevos sistemas de fallas. También hay evidencias de deformación dúctil con una edad no determinada pero claramente pre-Cretácea (Felder et al, 2000).

La falla más cercana que se presenta en la Zona de estudio corresponde a La Falla La Baja, su nombre se debe a que atraviesa la Quebrada La Baja, esta falla pertenece a un ramal de la Falla Cucutilla. Gran parte de los lineamientos fotogeológicos de la Falla La Baja están orientados N-NE, los cursos de las quebradas Chicaguá, San Juan y La Baja corresponden a estos lineamientos<sup>7</sup>.

Al presentar esta dirección de lineamientos, la falla de La Baja puede ser interpretada como una falla producida por esfuerzos tensionales en un sistema de cizallamiento (Ward et al, 1973).

Gracias al dominio estructural de La falla La Baja que ejerce sobre La Quebrada del mismo nombre, ha contribuido a que se presenten circulación y depositación de minerales de interés económico (Bueno, 1955 y Carvajal y Rodríguez, 1975), los filones de San Celestino, Píe de Gallo, El Cuatro y La Mascota están relacionados al pórfido que posiblemente estuvo controlado por la falla La Baja (Mendoza y Jaramillo, 1979). A estas fallas se les ha comprobado un movimiento pre y post cretácico (Mendoza y Jaramillo, 1979).

---

<sup>7</sup> MENDOZA, H. y JARAMILLO, L. Geología y Geoquímica del Área de California, Santander. Boletín de Geológico. INGEOMINAS, 1973. volumen 22, No. 2.

## **6. MARCO TEÓRICO**

### **6.1. MACIZO ROCOSO**

Se define macizo rocoso al estado en el que las rocas se presentan en el medio natural.

Así pues, el macizo rocoso está conformado por una serie de bloques de roca intacta que presenta algún tipo de estructura formada por múltiples discontinuidades (comúnmente agrupadas en familias) y otros caracteres estructurales como estratificación, pliegues y fallas. Por tanto su comportamiento dependerá de la roca y discontinuidades, influyendo más unas u otras en función de las características del macizo y sus propiedades, como también de la situación y volumen de las obras que se realicen en ellos. Un aspecto importante de los macizos rocosos es que son discontinuos y pueden presentar propiedades heterogéneas y/o anisótropas.

### **6.2. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO<sup>8</sup>**

Los sistemas de clasificación tienen como objetivo evaluar las características del macizo rocoso para determinar su calidad. Los criterios para la clasificación tienen que ser claros y consistentes para que no haya ninguna duda a la hora de ejecutar obras y las categorías que se le asigne deben ser específicas, de tal forma que

---

<sup>8</sup> MORALES C.Mario Orlando. Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en yacimiento Franke, Santiago de Chile, 2009.

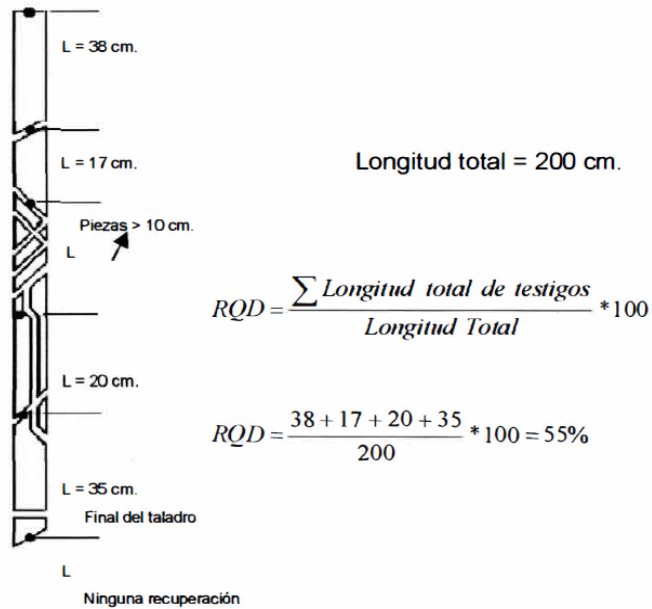
sea imposible asignarle a un macizo rocoso dos categorías que sean diferentes. Debido a la complejidad que presentan los macizos rocosos, es recomendable emplear dos o más métodos de clasificación que se puedan correlacionar entre sí para determinar una mejor evaluación de la calidad del macizo.

Las clasificaciones propuestas para este trabajo son la de Bieniawski (RMR), la de Barton(Q) y la de la de Hoek-Brown (GSI). A continuación se expondrá con más detalle estas tres propuestas.

**6.2.1. RMR- Bieniawski (1976):** Actualizada en 1989, esta clasificación otorga puntaje a 6 parámetros, con una suma máxima de 100. El puntaje total se llama RMR, “Rock Mass Rating”. Los parámetros a calificar son:

- **Resistencia de la Roca Intacta:** Es una medida física de la resistencia de los bloques de roca al ser probados por medios simples de campo como la presión manual, navaja, punzón y golpes del martillo geológico.
- **RQD:** El índice RQD (Rock Quality Designation) corresponde al porcentaje de recuperación de testigos mayor a 10 cm de longitud en su eje, sin tener en cuenta las fracturas mecánicas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo (*Figura 5*). Para nuestro caso se utiliza midiendo sobre el macizo expuesto, haciendo una observación representativa de las características, y correlacionando con la prospección del sondeo.

**Figura 5.** Ejemplo para calcular el RQD



Fuente: (Deere, 1989)

- **Espaciamiento de discontinuidades:** se refiere a la distancia media entre los planos de las discontinuidades de la misma familia.
- **Condiciones de las discontinuidades:** se subdivide en dos parámetros que comprende la longitud y rugosidad en las discontinuidades.
- **Condiciones de Agua Subterránea:** Mide la presencia de agua en el macizo.

La calificación para cada parámetro se hace teniendo en cuenta la tabla de la (Tabla 1), y de acuerdo al valor de la sumatoria de los parámetros, se clasifica la roca y de esta forma se determina el tipo y calidad de roca (Tabla 2).

**Tabla 1.** Tabla de valoración para los parámetros de clasificación RMR.

1.- RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA (Ensayo de Carga Puntual e ISRM)							
ISRM	R6	R5	R4	R3	R2	R1	R0
Rango de valores	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
Puntaje	15	12	7	4	2	1	0

2.- VALOR DE RQD (Rock Quality Index)					
Rango de valores	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25
Puntaje	20	17	13	8	3

3.- ESPACIADO DE LAS DISCONTINUIDADES					
Rango de valores	2m	0,6 / 2m	0,2 / 0,6m	0,06 / 0,2m	0,06m
Puntaje	20	15	10	8	5

4.- CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES					
Persistencia de las discontinuidades					
Rango de valores	<1m	1 / 3m	3 / 10m	10 / 20m	>20m
Puntaje	6	4	2	1	0
Abertura Rugosidad Relleno Alteración	Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, roca labios sana.	Ligeramente rugosa, separación <1mm, roca labios ligeramente meteorizada	Ligeramente rugosa, separación <1mm, roca labios muy meteorizada	Slickenside, falla, rellenos de espesor <5mm, o juntas abiertas 1-5 mm	Relleno blando (gouge) de espesor > 5mm, o juntas abiertas > 5 mm
Puntaje	24	18	12	6	0

5.- CONDICIONES GENERALES DEL AGUA SUBTERRANEA					
Condición	Completamente seca	Humeda	Mojada	Goteo	Agua Fluyendo
Puntaje	15	10	7	4	0

Fuente: MINESA S.A.S.

**Tabla 2.** Clasificación del macizo rocoso según el índice RMR.

CLASE	CALIDAD	VALORACIÓN RMR
I	Muy buena	100 - 81
II	Buena	80 - 61
III	Media	60 - 41
IV	Mala	40 - 21
V	Muy mala	<20

Fuente: (Bieniawski, 1976).

**6.2.2. Q - Barton (1974):** Actualizada en 1994, esta clasificación determina la calidad del macizo y se aplica en definición de requerimientos de sostenimiento en excavaciones subterráneas. El valor del índice Q está basado en los siguientes 6 parámetros:

- **RQD:** Porcentaje de fragmentos de roca mayor a 10 cm.
- **Jn:** Este parámetro corresponde al índice de familias de diaclasas, teniendo en cuenta que una familia de diaclasas son aquellas que están orientadas de forma paralela o sub-paralela entre sí. El valor del Jn se selecciona siguiendo las descripciones de la *Tabla 3*.

**Tabla 3.** Índice de familia de diaclasas.

Índice de familias de diaclasas		Jn
A	Roca masiva, sin diaclasas o con figuración escasa	0.5 – 1
B	Una familia de diaclasas	2
C	Una familia y algunas diaclasas aleatorias	3
D	Dos familias de diaclasas	4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias	6
F	Tres familias de diaclasas	9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias	12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones.	15
J	Roca triturada, terrosa	20

Fuente: *Manual de Logueo de Núcleos de Perforación 2015, MINESA S.A.S.*

- **Jr:** Califica la rugosidad de las fracturas y se desprecia cuando esta presenta una separación continua mayor a 5 mm entre las caras de la fractura. Este parámetro se evalúa de acuerdo a la descripción de la *Tabla 4*.

**Tabla 4.** Índice de rugosidad de las fracturas.

Índice de rugosidad de las discontinuidades		Jr
a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad.		
b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10[cm].		
A	Diaclasas discontinuas	4
B	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares	3
C	Diaclasas onduladas, lisas	2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas con slickensides	1.5
E	Diaclasas planas, rugosas o irregulares	1.5
F	Diaclasas planas, lisas	1
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas con slickensides	0.5
c) No existe contacto entre las caras de la discontinuidad ante un desplazamiento.		
H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad	1
J	Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad	1

Fuente: *Manual de Logueo de Núcleos de Perforación 2015, MINESA S.A.S.*

- **Ja:** Evalúa el relleno presente entre las fracturas, y se dividen en tres categorías: a) Si existe contacto entre las paredes; b) Separación continua menor a 5 mm, es decir rellenos en pequeños espesores; c) Separación continua mayor a 5 mm, es decir rellenos de espesores considerables. La calificación se dará teniendo en cuenta las descripciones de la *Tabla 5*.

**Tabla 5.** Índice de alteración de las discontinuidades.

Índice de alteración de las discontinuidades		$\phi_r$	Ja
a) Contacto entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios)			
A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo	–	0.75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas	25° – 35°	1
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no blandos, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	25° – 30°	2
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda)	20° – 25°	3
E	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito, etc. y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	8° – 16°	4
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10[cm]. (minerales de relleno en pequeños espesores)			
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	25° – 30°	4
G	Fuertemente consolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores menores a 5[mm])	16° – 24°	6
H	Consolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5[mm])	12° – 16°	8
J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir montmorillonita, esmectita (continuos, pero con espesores inferiores a 5[mm]). El valor de Ja depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas	6° – 12°	8 – 12
c) No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos de mineral de gran espesor)			
K L M	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G, H y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6° – 24°	6.8 ó 8 – 12
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles	–	5
O P R	Zonas o bandas continuas de arcillas, de espesor grueso (ver clases G, H y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6° – 24°	10, 13 ó 13 – 20

Fuente: Manual de Logueo de Núcleos de Perforación 2015, MINESA S.A.S.

- **Jw:** Corresponde a la presión de agua la cual tiene un efecto negativo en la resistencia de las diaclasas al cizallamiento, debido a una reducción en el esfuerzo normal efectivo que actúa sobre la masa de roca; además que el agua puede lavar y reblandecer los rellenos. La calificación se hace siguiendo las descripciones de la *Tabla 6*.

**Tabla 6.** Factor de reducción de agua.

Factor de reducción de agua		Presión aproximada de agua (kg/cm <sup>2</sup> )	Jw
A	Excavaciones secas o con flujo menor < 5 l/min localmente	< 1	1
B	Flujo o presión media, lavado ocasional de los rellenos en las fracturas	1- 2,5	0,66
C	Flujo grande o presión alta en roca competente sin rellenos en las fracturas	2,5 - 10	0,5
D	Flujo grande o presión alta, lavado considerable de los rellenos en las fracturas	2,5 - 10	0,33
E	Flujo o presión excepcionalmente alta durante la voladura, disminuyendo con el tiempo	> 10	0,2 - 0,1
F	Flujo o presión excepcionalmente alta continua, sin disminución notable	> 10	0,1 - 0,05

Fuente: *Manual de Logueo de Núcleos de Perforación 2015, MINESA S.AS.*

- **SRF:** Este parámetro valora los esfuerzos totales efectivos que actúan en la zona y que pueden causar problemas estructurales en la estabilidad. La calificación se dará teniendo en cuenta las descripciones de la *Tabla 7*.

**Tabla 7. Factor de reducción de esfuerzos.**

Factor de reducción de esfuerzos		SRF
<b>a) Zonas de debilidad intersectando la excavación, que podrían causar desprendimiento de rocas cuando se excave el túnel</b>		
A	Múltiples ocurrencias de zonas de debilidad conteniendo arcilla o roca químicamente desintegrada, roca circundante muy suelta (cualquier profundidad)	10
B	Zona de debilidad conteniendo arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de la excavación ≤ 50 m)	5
C	Zona de debilidad conteniendo arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de la excavación > 50 m)	2,5
D	Múltiples zonas de cizalla en roca competente (sin arcilla), roca circundante suelta (cualquier profundidad)	7,5
E	Zona de cizalla en roca competente (sin arcilla) (profundidad de la excavación ≤ 50 m)	5
F	Zona de cizalla en roca competente (sin arcilla) (profundidad de la excavación > 50 m)	2,5
G	Zona suelta, diaclasas abiertas, intenso fracturamiento o "cubos de azúcar", etc. (cualquier profundidad)	5
<b>b) Roca competente, problemas causados por esfuerzos</b>		
H	Bajos esfuerzos, cerca de la superficie, fracturas abiertas	2,5
J	Esfuerzos moderados, condición de esfuerzos favorable	1
K	Esfuerzos altos, estructura muy apretada. Usualmente favorable a la estabilidad, puede no ser favorable para la estabilidad de las paredes	0,5 - 2
L	Moderada generación de bloques después de una hora en roca masiva	5 - 50
M	Generación de bloques y estallido de rocas tras unos pocos minutos en roca masiva	50 - 200
N	Fuerte estallido de roca (estallido por tensión) y deformaciones dinámicas inmediatas en roca masiva	200 - 400
<b>c) Roca compresiva: flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostáticas</b>		
O	Leve presión de roca compresiva	5 - 10
P	Fuerte presión de roca compresiva	10 - 20
<b>d) Roca expansiva: actividad química expansiva dependiente de la presencia de agua</b>		
R	Leve presión de roca expansiva	5 - 10
S	Fuerte presión de roca expansiva	10 - 15

Tomado de Manual de Logueo de Núcleos de Perforación 2015, MINESA S.A.S.

Con base en los parámetros explicados anteriormente, se define la calidad del macizo rocoso de la siguiente manera:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

Donde tenemos los cocientes:

RQD/J<sub>n</sub>: representa el tamaño de los bloques.

J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub>: permite estimar la resistencia al corte entre bloques.

J<sub>w</sub>/SRF: indica el estado tensiones en el macizo rocoso.

Su calificación se da de acuerdo a un escala logarítmica, de 0,001 a 1000 y se clasifican en nueve categorías como se muestra en la *Tabla 8*.

Considerando los intervalos de variación de los valores que definen los seis parámetros del índice de calidad Q del macizo rocoso, se deduce que éste oscila entre 10<sup>-3</sup> y 10<sup>3</sup>. Según los valores de Q, se clasifican los macizos rocosos en nueve categorías.

**Tabla 8.** Clasificación del macizo rocoso según el índice Q.

TIPO DE MACIZO	VALOR DE Q
Excepcionalmente malo	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-2</sup>
Extremadamente malo	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>-1</sup>
Muy malo	10 <sup>-1</sup> - 1
Malo	1 - 4
Medio	4 - 10
Bueno	10 - 40
Muy bueno	40 - 100
Extremadamente bueno	100 - 400
Excepcionalmente bueno	400 - 1000


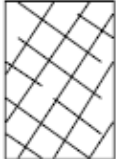




Fuente: (Barton, 1974).

**6.2.3. GSI – Hoek (1994):** El índice GSI (Índice Geológico de Resistencia) indica la reducción de la resistencia de un macizo rocoso, con respecto a la roca intacta, para diferentes condiciones geológicas. Se obtiene a partir de un examen visual del macizo rocoso en afloramientos haciendo observación de dos parámetros: estado de fracturamiento y calidad de las discontinuidades

El GSI se debe dar en un rango de valores siguiendo la clasificación de las *Tablas 9 y 10*.



**Tabla 10.** Estimación del Índice Geológico de resistencia, GSI, en base a una Descripción Geológica del Macizo Rocoso.

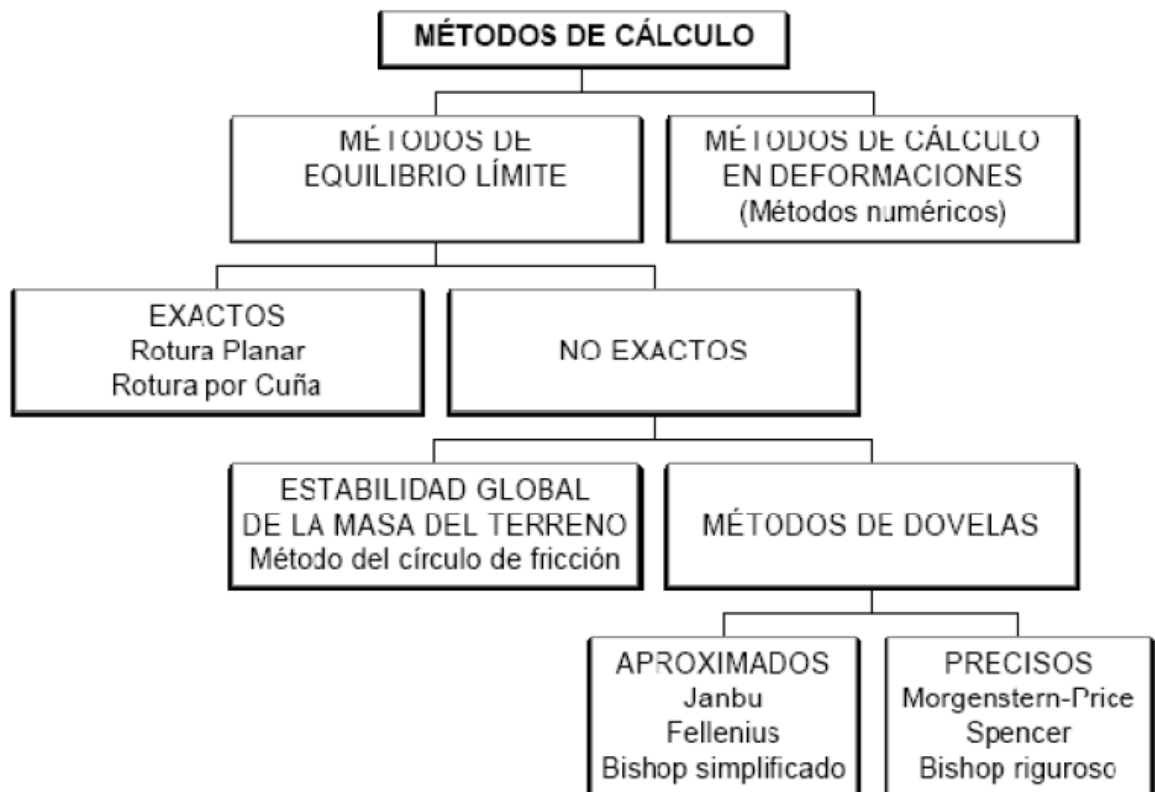
<p><b>INDICE GEOLOGICO DE RESISTENCIA</b></p> <p>De los códigos de letra que describen la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades (en Tabla 4), seleccione el cuadro apropiado en esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia, <b>GSI</b>, de los contornos que muestra la tabla. No trate de obtener un mayor grado de precisión. Indicar un rango de valores para <b>GSI</b>, por ejemplo de 36 a 42, es más realista que indicar un único valor, por ejemplo 38.</p>		<p><b>CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES</b></p> <p><b>MUY BUENA</b> Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración)</p> <p><b>BUENA</b> Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con patinas de óxido de hierro</p> <p><b>REGULAR</b> Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas</p> <p><b>MALA</b> Superficies lisas y óxaladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con rellenos de fragmentos granulares y/o arcillosos firmes</p> <p><b>MUY MALA</b> Superficies lisas y óxaladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos</p>				
<p><b>ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO</b></p>		<p><b>EMPEORA LA CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES</b> </p>				
	<p><b>FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY)</b></p> <p>MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS, ORTOGONALES ENTRE SÍ.</p>	<p>80</p>	<p>70</p>			
	<p><b>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY)</b></p> <p>MACIZO ROCOSO ALGO PERTURBADO, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA TRABADOS, DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR CUATRO O MAS SETS DE ESTRUCTURAS.</p>	<p>60</p>	<p>50</p>			
	<p><b>FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED)</b></p> <p>MACIZO ROCOSO PLEGADO Y/O AFECTADO POR FALLAS, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR LA INTERSECCION DE NUMEROSOS SETS DE ESTRUCTURAS.</p>	<p>40</p>		<p>30</p>		
	<p><b>DESINTEGRADO (DISINTEGRATED)</b></p> <p>MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO POBREMENTE TRABADO DE BLOQUES Y TROZOS DE ROCA, ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS</p>	<p>20</p>	<p>10</p>			
		<p><b>DISMINUYE LA TRABAZON DE LOS BLOQUES DE ROCA</b> </p>				

Fuente: Hoek E. & Brown, 1988.

### 6.3. CÁLCULOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS<sup>9</sup>

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud buscan determinar el factor de seguridad (FS) del mismo y se pueden clasificar en dos grandes grupos: métodos de cálculo de deformaciones y métodos de equilibrio límite. (Figura 6).

**Figura 6.** Esquema métodos de cálculo para estabilidad de taludes.



Fuente: Guía de cálculo de estabilidad de taludes rocosos. Fernando Herrera.

<sup>9</sup> HERRERA RODRIGUEZ, Fernando. Guía de cálculo de estabilidad de taludes rocosos. Madrid 2000.

**6.3.1. MÉTODOS DEL CÁLCULO EN DEFORMACIONES:** Consideran el cálculo de las deformaciones en terreno, además de las leyes de la estática. Su aplicación práctica es de gran complejidad y el problema debe estudiarse usando métodos de elementos finitos u otros métodos numéricos.

**6.3.2. MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE:** Se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte. Se pueden clasificar a su vez en dos grupos:

- **MÉTODOS EXACTOS:** Se refieren a los cálculos de fallas con total control estructural. Podemos distinguir en los métodos exactos aquellos destinados a identificar roturas planares y por causa de cuñas.
  - ✓ **Modelo Estructural Determinístico:** Este modelo reconoce que la causa más probable de un colapso es a través de estructuras geológicas que forman bloques o cuñas que pueden deslizar por la pared del talud. Se asigna un valor único a cada una de las variables que intervienen en el cálculo y se obtiene finalmente una estimación de la posibilidad de deslizamiento en función de un factor de seguridad. En la medida de que este factor es mayor que 1,5 o que un valor superior que se acepta como valor mínimo (para cubrir posibles incertezas en la asignación de las propiedades), el talud se considera estable. Este es el método será empleado más adelante para los análisis de estabilidad de cuñas.

Para el análisis de estabilidad en rotura por cuñas la obtención del factor de seguridad es tarea más compleja que en el caso de rotura planar, debido a que el cálculo debe realizarse en tres dimensiones y no en dos. El factor de seguridad se obtiene como cociente entre las fuerzas resistentes del terreno y las fuerzas que tienden a provocar el deslizamiento.

✓ **Modelo Estructural Probabilístico:** En este modelo, la estabilidad del talud se expresa en términos de la probabilidad de que el talud falle. El método empleado en este caso corresponde a una simulación de Montecarlo, en el cual cada propiedad o variable se expresa como una distribución estadística. Las variables o parámetros que se presentan como una función de probabilidad, son la orientación de los planos de debilidad, la cohesión y ángulo de fricción. La simulación obtiene valores de cada parámetro en forma aleatoria de cada distribución y se calcula un factor de seguridad en base a los valores obtenidos. Al repetir este análisis un número significativo de veces, se obtiene una distribución de factores de seguridad. Así es posible conocer la probabilidad de que el factor de seguridad sea menor que 1,0; por ejemplo. El uso de este método está difundido en estudios de estabilidad de taludes y existen numerosas publicaciones que analizan el método y lo proponen como uno de los más adecuados para el desarrollo de un modelo probabilístico.

- **MÉTODOS NO EXACTOS:** Se puede distinguir aquí entre los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, prácticamente en desuso, y los métodos de dovelas, o rebanadas. Este último es en el que casi la totalidad de los métodos utilizados actualmente se basan y consisten en dividir el macizo potencialmente deslizante en rebanadas verticales,

calcular el equilibrio de cada una de ellas, y finalmente analizar el equilibrio global, obteniendo el factor de seguridad, que se define como la relación entre fuerzas o momentos resistentes y fuerzas o momentos motores.

#### **6.4. MODELOS DE FALLA DE TALUD<sup>10</sup>**

Para el análisis de estabilidad de taludes en roca se emplean generalmente modelos numéricos de las posibles condiciones de falla de talud.

Es por ello que el trabajo de campo y los ensayos de laboratorio son importantes para evaluar el comportamiento geomecánico del talud y determinar el tipo de fallo lo que repercutirá en costos como también en el método de estabilización a emplear.

A continuación se presenta una revisión de los tipos de fallas en un talud: donde se dividen en dos clases: Los tipos de fallamiento cuando este se encuentra dominada por las estructuras (con control estructural) y cuando no es posible determinar la familia de discontinuidades que determinaría el modo de falla (sin control estructural).

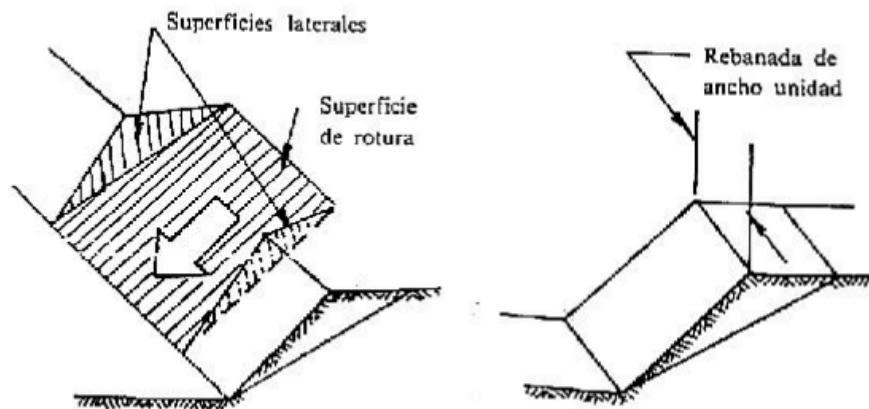
---

<sup>10</sup> HERRERA RODRÍGUEZ, Fernando. Guía de cálculo de estabilidad de taludes rocosos. Madrid. 2000

#### 6.4.1. FALLAS CON CONTROL ESTRUCTURAL

- **FALLA PLANAR:** Es aquella en la que el deslizamiento se produce a través de una única superficie plana. Es la más sencilla de las formas de rotura posibles y se produce cuando existe una fracturación dominante en la roca y convenientemente orientada respecto al talud. Frecuentemente se trata de fallas que interceptan al talud. También puede producirse en terrenos granulares en los que, entre dos terrenos de buenas características resistentes, se intercala un estrato de poco espesor de material con menos resistencia. Se prevé el deslizamiento cuando el rumbo de la familia de discontinuidades es similar al del talud y su buzamiento menor que este (*Figura 7*).

*Figura 7. Falla Tipo Planar.*

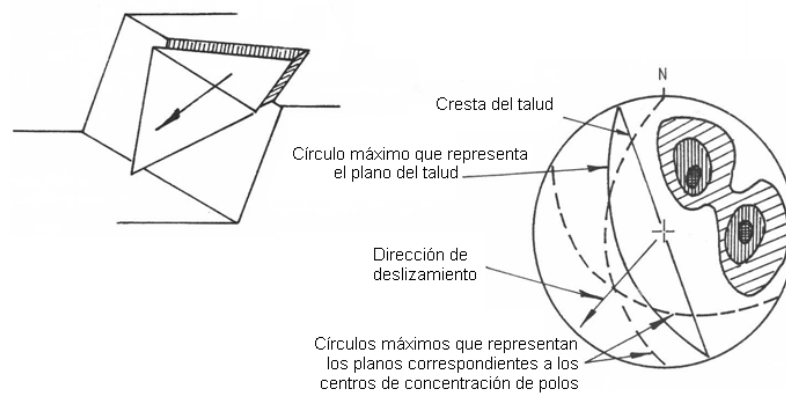


*Fuente: Guía de cálculo de estabilidad de taludes rocosos. Fernando Herrera.*

- **FALLA EN CUÑAS:** Este tipo de fallas se produce a través de dos discontinuidades oblicuamente a la superficie del talud, con la línea de intersección de ambas aflorando en la superficie del mismo y buzando en sentido desfavorable. Este tipo de rotura se origina preferentemente en macizos rocosos en los que se da una disposición adecuada, en orientación y buzamiento de las diaclasas.

Si proyectamos el plano del talud y las discontinuidades en una proyección semiesférica equiareal de Schmidt, la disposición típica de los casos en que es posible este tipo de rotura, es como el que aparece en la *Figura 8*. En ella se aprecian dos familias de discontinuidades de rumbos oblicuos respecto al del talud, quedando el rumbo de éste comprendido entre los de las familias de discontinuidades.

**Figura 8.** Falla Tipo Cuñas.

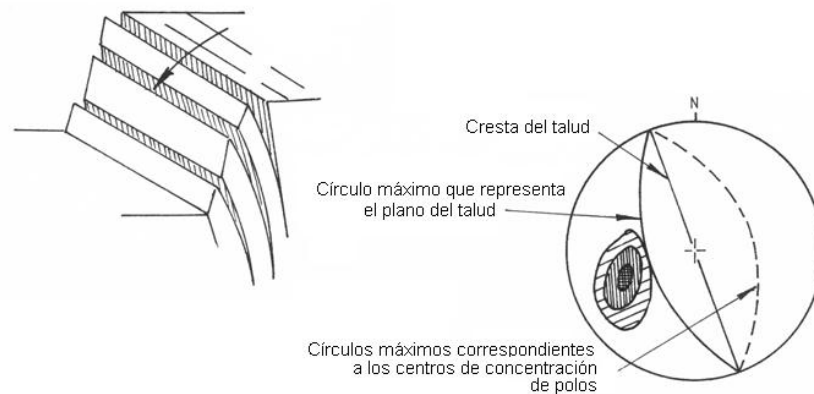


*Fuente: Guía de cálculo de estabilidad de taludes rocosos. Fernando Herrera.*

- **FALLA POR VOLCAMIENTOS:** Una falla por volcamiento se produce debido a la existencia de un set de fracturas paralelas o subparalelas y otro

set perpendicular o sub-perpendicular. Estas estructuras forman bloques los cuales pierden la adhesión a la matriz y pueden rotar por sobre la base por efectos de la gravedad. La condición en la red de Schmidt se observa en la *Figura 9*.

**Figura 9.** Falla por volcamientos.



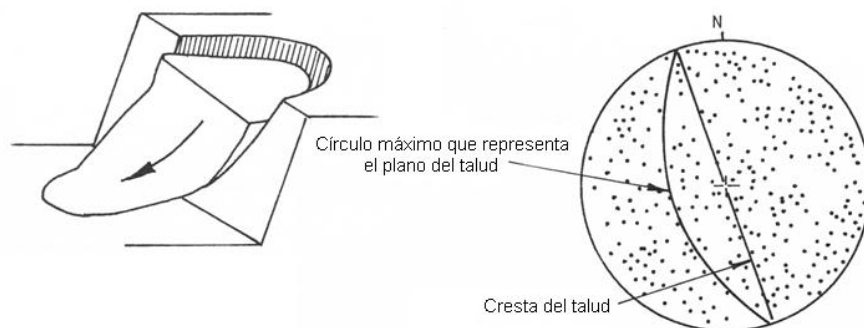
*Fuente: Guía de cálculo de estabilidad de taludes rocosos. Fernando Herrera.*

#### 6.4.2. FALLAS SIN CONTROL ESTRUCTURAL

- **FALLA POR CAÍDA DE ROCAS:** Es el tipo de falla más simple, y sucede cuando una roca suelta, o varias, se movilizan producto de una pequeña perturbación que hace cambiar su estado desde reposo a movimiento, rodando por el talud hasta quedar detenida. Su predicción es muy difícil y por tanto se recurre comúnmente a métodos de contención de rocas en la caída más que al modelamiento de la falla misma, por lo tanto modelos de simulación de caída relativas de rocas sueltas son capaces de producir razonablemente exactas predicciones de trayectorias de caída de rocas.

- **FALLA CIRCULAR:** También conocida como deslizamiento o falla rotacional, es producida por muchos sets de fallas, las cuales tienen distintos rumbos y manteos, y dejan la roca muy fracturada, perdiendo la cohesión. Por la cantidad de fracturas, el macizo rocoso se transforma en una especie de gravilla, la que desliza por la cara del talud, tal como se muestra en la *Figura 10*. Esta aproximación de rotura se hace cuando no es posible determinar la familia de discontinuidades que controla la inestabilidad.

**Figura 10.** Falla Circular.



Fuente: *Guía de cálculo de estabilidad de taludes rocosos. Fernando Herrera.*

## 6.5. OBRAS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

La estabilización de taludes se puede lograr mediante sostenimiento por medio de obras estructurales, conformación de la superficie o canalizando drenajes. Debido al comportamiento de los macizos rocosos es difícil evaluar cuantitativamente la efectividad de los métodos de estabilización.

**6.5.1. PERNOS DE ANCLAJE:** Los pernos son barras de refuerzo que se cementan dentro de perforaciones formando una dovela de concreto reforzada para prevenir que se suelte un bloque de roca en la cresta de un talud (*Fotografía 2*).

Estos pernos son comúnmente varillas de acero colocadas en huecos pre-perforados, inyectando una resina epóxica o cemento; las varillas generalmente no son tensionadas, debido a que la roca puede moverse al colocar la tensión. Se utiliza acero de alta resistencia en diámetros que varían desde  $\frac{1}{2}$  a 1.5 pulgadas.

El objetivo de los pernos es el de generar un refuerzo o resistencia a la tensión dentro del macizo, uniendo las discontinuidades. Los pernos también pueden utilizarse para sostener cables, mallas y otros elementos de soporte del macizo. El principal uso de los pernos es el de sostener bloques para impedir su deslizamiento o caída. Igualmente se pueden sostener cuñas o grandes masas de roca. En el diseño de los pernos se deben tener en cuenta: dimensiones del perno, protección contra la corrosión, tipo de cementante, longitud total y del bulbo, cementado, patrón de anclaje y el procedimiento de prueba de carga.

**Fotografía 2.** Pernos de Anclaje.



Fuente: <http://www.desplom.com/en/anchoring-and-bolts>

**6.5.2. ANCLAJES TENSIONADOS:** Este método consiste en la colocación dentro del macizo de roca y muy por debajo de la superficie de falla real o potencial de una serie de tirantes de acero anclados. Estos anclajes generalmente utilizan cable de acero, los cuales se colocan en huecos pre-perforados e inyectados, tensados por medio de gatos en la superficie. Los anclajes generan fuerzas de compresión que aumentan la fricción y/o contrarrestan la acción de las fuerzas desestabilizadoras. En superficie las anclas se apoyan en platinas de acero o en bloques o zapatas de concreto armado, para permitir su anclaje y transmitir la carga al suelo subsuperficial.

Los anclajes tensionados impiden el deslizamiento de bloques de roca a lo largo de un plano de estratificación o fractura. La fuerza de tensionamiento depende de la longitud y características del anclaje y no es raro utilizar fuerzas hasta de 50 toneladas por ancla.

**6.5.3. HORMIGÓN PROYECTADO:** Se denomina hormigón proyectado al mortero colocado por bombeo a presión con agregados hasta de 20 mm de diámetro. Cuando el mortero utiliza partículas de menor tamaño se le denomina "gunita". El concreto o gunita generalmente, se aplica en capas de 8 a 10 centímetros de espesor. Este concreto ayuda a sostener los bloques del macizo en su puesto, actuando como una membrana soportada por la resistencia a la tensión y al cortante del mortero. La membrana no actúa por sí sola como estructura de contención y no hay transferencia de cargas de la masa de roca a la membrana de concreto. La pantalla de concreto proyectado actúa como refuerzo superficial y no como contención.

Es importante limpiar la superficie del talud antes de colocar el concreto. Se deben instalar perforaciones o "lloraderos" a través de la membrana de concreto para impedir la formación de presiones de agua detrás de esta. Para obtener mejores

resultados se recomienda colocar el concreto inmediatamente después de realizada la excavación. Se prefiere que la superficie se encuentre seca.

**Fotografía 3.** Hormigón proyectado.



Fuente: <https://masqueingenieria.com/blog/hormigones-especiales-hormigon-proyectado/>.

## **7. SOFTWARES EMPLEADOS**

Para la visualización de datos y cálculo de los análisis de estabilidad en los próximos capítulos serán empleados los softwares especializados Dips Slide y Swedge de la casa Rocscience. A continuación se hace una breve descripción hacer de estos softwares:

### **7.1. GENERALIDADES DEL SOFTWARE DIPS ROCSCIENCE<sup>11</sup>**

DIPS es un programa diseñado para el análisis interactivo de datos geológicos orientados. El programa es un conjunto de herramientas capaz de muchas aplicaciones diferentes y está diseñado tanto para el usuario novato u ocasional como para el usuario avanzado de proyección estereográfica que desea utilizar herramientas más avanzadas en el análisis de datos geológicos.

DIPS permite al usuario analizar y visualizar datos estructurales siguiendo las mismas técnicas que se usan en los estereonetos manuales. Además, hay muchas funciones computacionales disponibles, como el contorno estadístico de la agrupación de orientación, el cálculo de la orientación media y el análisis de atributos cualitativos y cuantitativos.

DIPS ha sido diseñado para el análisis de características relacionadas con el análisis de ingeniería de estructuras de rocas, sin embargo, el formato libre del

---

<sup>11</sup> DIPS, Plotting, Analysis and Presentation of Structural Data Using Spherical Projection Techniques User's Guide 1989 - 2002 Rocscience Inc.

archivo de datos DIPS permite el análisis de cualquier información basada en orientación.

## **7.2. GENERALIDADES DEL SOFTWARE SLIDE ROCSCIENCE<sup>12</sup>**

Slide es un software disponible para el análisis de estabilidad de taludes. Este programa en 2D tiene un atractivo CAD (diseño con ayuda del ordenador) basado en la interfaz gráfica con una amplia variedad de modelos y tiene opciones de interpretación de datos que permiten realizar un análisis completo y rápido.

Usando el programa Slide, se puede evaluar la estabilidad de falla circular y no circular en taludes de suelos y roca. Fácilmente se modela la geometría de un talud complejo, se dibuja como se haría en cualquier CAD o importamos una imagen y digitalizamos encima de ella. Los taludes artificiales y naturales con estratos complejos, lentes de arcilla, se planean e incorporan fácilmente. La presa de tierra con el centro complejo y geometrías de pantallas también se planea fácilmente. El intérprete de los datos tiene un conjunto de herramientas que permite el despliegue conveniente de resultados ejemplares. Con el Slide se puede muy rápida y fácilmente crear un modelo, realizar el análisis de estabilidad, e interpretar los resultados.

Slide analiza la estabilidad en superficies de deslizamientos usando métodos de equilibrio límite con rodajas verticales. Analiza superficies de deslizamiento

---

<sup>12</sup> Tutorial Slide. Disponible en:  
[www.rocscience.com/help/slide/webhelp7/Slide.htm#tutorials/Slide\\_Tutorials.htm](http://www.rocscience.com/help/slide/webhelp7/Slide.htm#tutorials/Slide_Tutorials.htm)

individuales o los métodos pueden ser aplicados para buscar y localizar la superficie del deslizamiento crítica para un talud dado.

Características principales de Slide:

- Métodos de búsqueda de la superficie crítica para superficies de deslizamiento circular o no circular.
- Bishop, Janbu, Spencer, GLE /Morgenstern- Price y otros métodos de análisis.
- Múltiples materiales. Anisotrópicos, materiales no-lineales Mohr-coulomb y otros.
- Agua subterránea a presión, factores  $R_u$ , red de presiones de poro, o el análisis de infiltración.
- Carga externa lineal, distribuida o sísmica.
- Soportes, geotextiles, pilotes. Análisis de fuerzas de apoyo requeridas.
- Vista de cualquiera o todas las superficies generadas por la búsqueda. Los resultados individuales detallados pueden trazarse para las superficies de deslizamiento.

### **7.3. GENERALIDADES DEL SOFTWARE SWEDGE ROCSCIENCE<sup>13</sup>**

Swedge es un programa rápido, interactivo y fácil de usar. Es una buena herramienta de análisis para evaluar la estabilidad de las cuñas de superficie en

---

<sup>13</sup> SWedge, Probabilistic analysis of the geometry and stability of surface wedges; User's Guide\_ 1991 Rocscience Inc.

pendientes de roca, definidas por la intersección de planos de discontinuidades, la superficie de la pendiente y una grieta de tensión opcional.

Swedge proporciona un entorno gráfico integrado para la entrada de datos rápida, fácil y la visualización de modelos 3D, también ofrece una amplia gama de opciones de análisis, incluyendo combinaciones deterministas, probabilístico, sensibilidad y análisis de la persistencia

Para un análisis Determinístico, Swedge calcula el factor de seguridad para una cuña de orientación conocida. Para un análisis Probabilístico, los datos de entrada estadística se pueden introducir para incertidumbre en la orientación conjunta y valores de resistencia. Esta es una distribución de factores de seguridad, donde se calcula la probabilidad de fallo. Para un análisis de combinación, cualquier número de planos de conjuntos puede ser definido, y Swedge calcula todas las combinaciones posibles de las intersecciones de conjuntos que pueden formar una cuña.

Otras características que incluye el modelado son las fuerzas desestabilizadoras como la presión del agua, fuerzas sísmicas, también los pernos de roca, hormigón proyectado o soportes de presión para aumentar el factor de seguridad de cuña.

Swedge ofrece una integración mejorada con el programa de Dips. Un archivo Dips completo se puede importar a Swedge y analizarlos con la opción de análisis de combinación, o la información estadística conjunto común (Distribución de Fisher) se pueden importar para un análisis probabilístico.

## **8. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO**

### **8.1. ZONIFICACION GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO**

En el macizo rocoso estudiado se establecieron 10 puntos de referencia a lo largo de la vía, dividiendo el área de estudio en 9 tramos.

Esta zonificación por tramos se hizo con el objetivo de obtener una caracterización con más detalle, observando las características que se diferencian de un tramo al otro tramo consecutivo, como el grado de fracturación, meteorización, presencia de agua, etc. De acuerdo a esta zonificación se hace más fácil la labor para la toma de datos geotécnicos/estructurales, y la recolección de muestras de roca intacta en cada tramo.

Teniendo como base esta zonificación; se trabajaron los mapeos, la representación de los datos estructurales en DIPS y en el modelamiento con Slide y Swedge.

### **8.2. MAPEO GEOTÉCNICO**

El mapeo geotécnico es el registro de las características de las discontinuidades del macizo rocoso en un formato determinado. El objetivo de esta labor consiste en caracterizar geotécnicamente el macizo rocoso para determinar su calidad, constituyendo así un registro sistemático de datos de campo como, estructuras, estado, cantidad y orientación de las discontinuidades, distribución de las litologías, ensayos in situ y la recolección de muestras para ensayos de laboratorio. Con base en estos parámetros se obtendrá una buena caracterización

geotécnica del macizo, prever el comportamiento y elaborar posteriormente el estudio de análisis de estabilidad.

De acuerdo a la zonificación explicada anteriormente, con la ayuda de la brújula, GPS, martillo geológico, y metro; se realizó el registro de los parámetros geotécnicos en cada tramo siguiendo las propuestas de clasificación del macizo rocoso planteadas por Hoek (GSI), Beniaowski (RMR), y Barton (Q). Estos registros se hicieron en los formatos de campo suministrados por MINESAS S.A.S que se encuentran en el **Anexo A**.

En las siguientes fotografías se aprecian rasgos geotécnicos en cada uno de los tamos mapeados. Es de notar que para los tamos  $\Delta 5-\Delta 6$  y  $\Delta 7-\Delta 8$  (*Fotografías 6 y 7*) no se realizaron mapeos geotécnicos ya que no fue posible la toma de los parámetros, ni de muestras de roca debido a que estos dos tramos se encuentran totalmente cubiertos por vegetación y suelo residual.

**Fotografía 4.** Panorámica del Tramo  $\Delta 1-\Delta 2$ .



**Fotografía 5. Panorámica del Tramo Δ2-Δ3.**



**Fotografía 6. Panorámica del Tramo Δ3-Δ4.**



**Fotografía 7.** Panorámica del Tramo Δ4-Δ5.



**Fotografía 8.** Panorámica del Tramo Δ5-Δ6.



**Fotografía 9.** Panorámica del Tramo Δ6-Δ7.



**Fotografía 10.** Panorámica del Tramo Δ7-Δ8.



**Fotografía 11.** Panorámica del Tramo Δ8-Δ9.

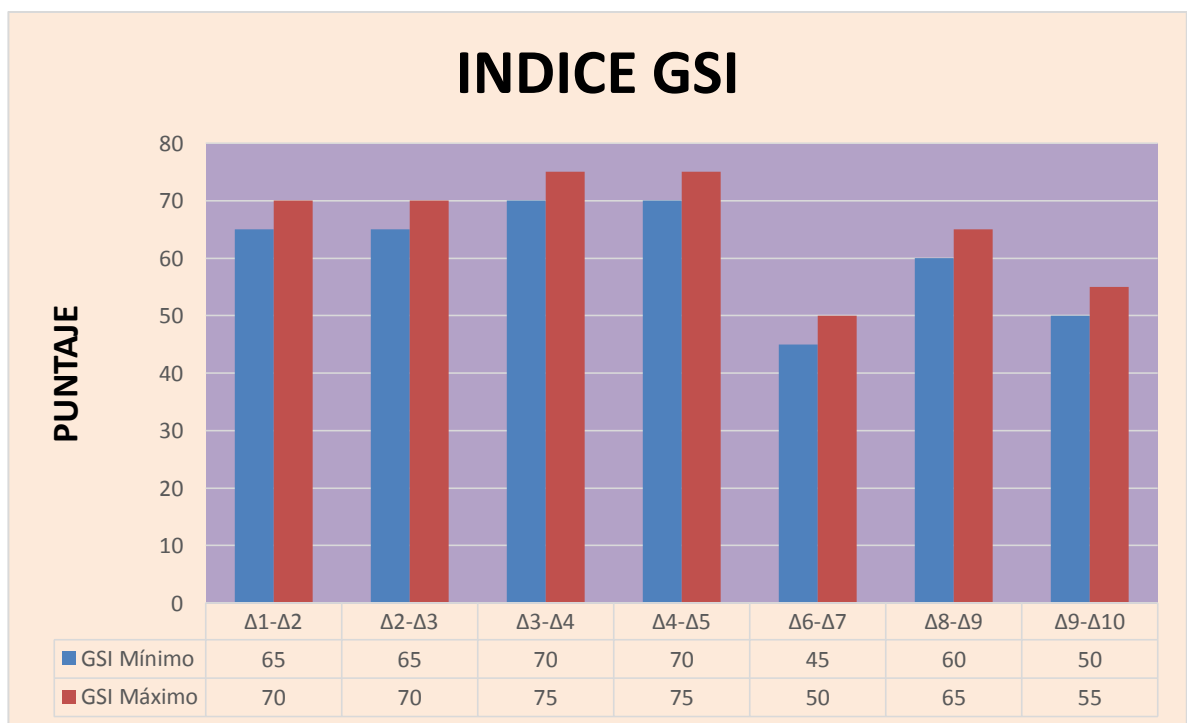


**Fotografía 12.** Panorámica del Tramo Δ9-Δ10.



Una vez realizados los mapeos para cada uno de los tramos, se pueden observar los siguientes gráficos estadísticos para los índices GSI, RMR Y Q de clasificación de los macizos rocosos.

**Figura 11.** Gráfica de análisis estadístico para la calificación GSI de los tramos mapeados.



De acuerdo con los puntajes del índice GSI obtenidos en cada uno de los tramos tenemos que los tramos se clasifican de la siguiente manera:

**Tabla 11.** Clasificación GSI para los tramos mapeados.

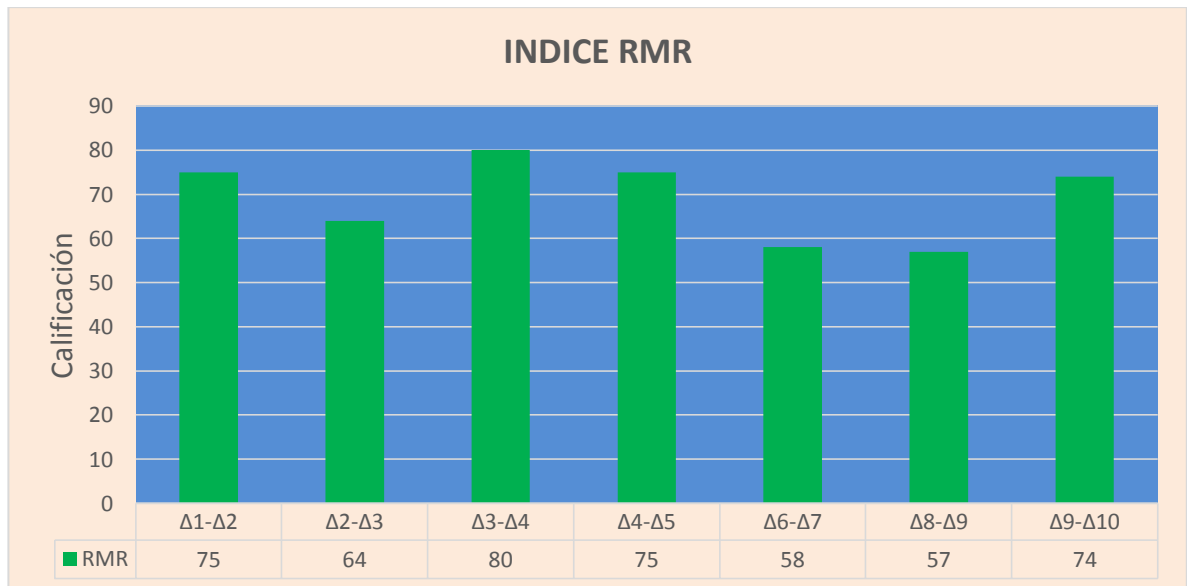
TRAMO	RANGO DE PUNTAJE	CLASIFICACIÓN GSI	
		ESTRUCTURA DEL MACIZO	CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES
$\Delta 1-\Delta 2$	65 - 70	Fuertemente Fracturado en Bloques	Muy Buena
$\Delta 2-\Delta 3$	65 - 70	Fuertemente Fracturado en Bloques	Muy Buena
$\Delta 3-\Delta 4$	70 - 75	Fracturado en Bloques	Muy Buena
$\Delta 4-\Delta 5$	70 - 75	Fracturado en Bloques	Muy Buena
$\Delta 6-\Delta 7$	45 - 50	Fuertemente Fracturado en Bloques	Regular
$\Delta 8-\Delta 9$	60 - 65	Fracturado en Bloques	Buena
$\Delta 9-\Delta 10$	50 - 55	Fuertemente Fracturado en Bloques	Buena

Tenemos que la mayor calificación GSI la tienen los tramos  $\Delta 3-\Delta 4$  y  $\Delta 4-\Delta 5$  con una clasificación de FB/MB (Macizo Fracturado en Bloques/ Discontinuidades Muy Buenas), seguido de los tramos  $\Delta 1-\Delta 2$  y  $\Delta 2-\Delta 3$  con una clasificación FF/MB (Macizo Fuertemente Fracturado/Discontinuidades Muy Buenas), luego el tramo  $\Delta 8-\Delta 9$  con clasificación FB/B (Macizo Fracturado en Bloques/Discontinuidades Buenas), después el tramo  $\Delta 9-\Delta 10$  de clasificación FF/B (Macizo Fuertemente Fracturado/Discontinuidades Buenas) y por último el tramo  $\Delta 6-\Delta 7$  con clasificación

FF/R (Macizo Fuertemente Fracturado/Discontinuidades Regular). Estas calificaciones de rangos GSI servirán más adelante como datos de entrada para el modelamiento en Slide.

En el siguiente grafico se aprecia las calificaciones RMR obtenidas en cada tramo:

**Figura 12.** Gráfica de análisis estadístico para la calificación RMR de los tramos mapeados.



De acuerdo con los puntajes del índice RMR obtenidos en cada uno de los tramos tenemos que los tramos se clasifican de la siguiente manera:

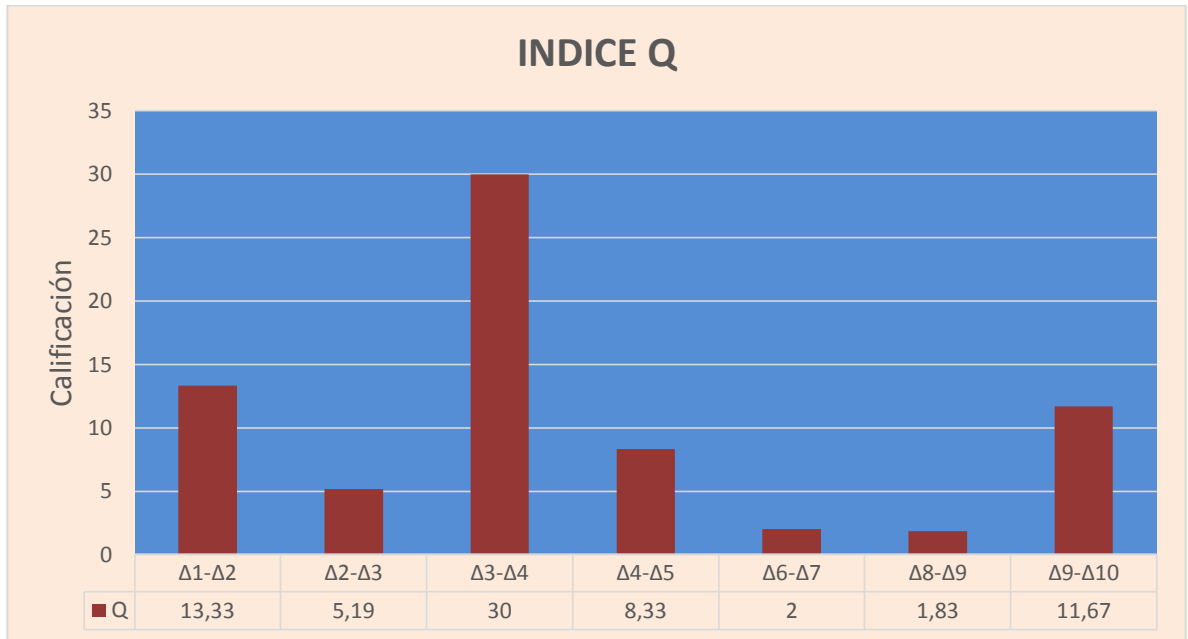
**Tabla 12.** Clasificación RMR para los tramos mapeados.

TRAMO	CALIFICACIÓN	CLASIFICACIÓN RMR
$\Delta 1-\Delta 2$	75	Roca Buena
$\Delta 2-\Delta 3$	64	Roca Buena
$\Delta 3-\Delta 4$	80	Roca Muy Buena
$\Delta 4-\Delta 5$	75	Roca Buena
$\Delta 6-\Delta 7$	58	Roca Regular
$\Delta 8-\Delta 9$	57	Roca Regular
$\Delta 9-\Delta 10$	74	Roca Buena

Tenemos que el tramo  $\Delta 3-\Delta 4$  presenta una mayor calidad del RMR con una Roca Muy buena, seguido de los tramos  $\Delta 1-\Delta 2$ ,  $\Delta 2-\Delta 3$ ,  $\Delta 4-\Delta 5$  y  $\Delta 9-\Delta 10$  con una calidad de Roca Buena y los tramos  $\Delta 6-\Delta 7$ ,  $\Delta 8-\Delta 9$ , con una Roca Regular, lo que podría comportarse como un talud inestable.

En el siguiente grafico se aprecia las calificaciones Q obtenidas en cada tramo:

**Figura 13.** Gráfica de análisis estadístico para la calificación Q de los tramos mapeados.



De acuerdo con los puntajes del índice Q obtenidos en cada uno de los tramos tenemos que los tramos se clasifican de la siguiente manera:

**Tabla 13.** Clasificación RMR para los tramos mapeados.

TRAMO	Q	CLASIFICACIÓN Q
$\Delta 1-\Delta 2$	13.33	Roca Buena
$\Delta 2-\Delta 3$	5.19	Roca Regular
$\Delta 3-\Delta 4$	30	Roca Buena
$\Delta 4-\Delta 5$	8.33	Roca Buena
$\Delta 6-\Delta 7$	2	Roca Pobre
$\Delta 8-\Delta 9$	1.83	Roca Pobre
$\Delta 9-\Delta 10$	11.67	Roca Buena

Tenemos que los tramos  $\Delta 1-\Delta 2$ ,  $\Delta 3-\Delta 4$ ,  $\Delta 4-\Delta 5$  y  $\Delta 9-\Delta 10$  presentan una mayor calidad del Q con una Roca Buena, seguido del tramo  $\Delta 2-\Delta 3$  con calidad de Roca Regular y por último los tramos  $\Delta 6-\Delta 7$  y  $\Delta 8-\Delta 9$ , con una Roca Pobre, lo que podría ocasionar un talud inestable.

### 8.3. ORIENTACIÓN DE LAS FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

Con la ayuda del software Dips de Rocscience se elaboró las proyecciones de los datos estructurales para cada tramo mapeado. Estas proyecciones se aprecian en el **Anexo B**.

En la *Tabla 14* se exponen los datos de las familias de discontinuidades que se registraron en los mapeos. Esta tabla se ha realizado para los parámetros de orientación dip direction (dirección de buzamiento) y dips (buzamiento), persistencia, espaciamiento, rugosidad y alteración de las discontinuidades presentes.

**Tabla 14.** *Tabla de los datos estructurales tomados en el mapeo geotécnico.*

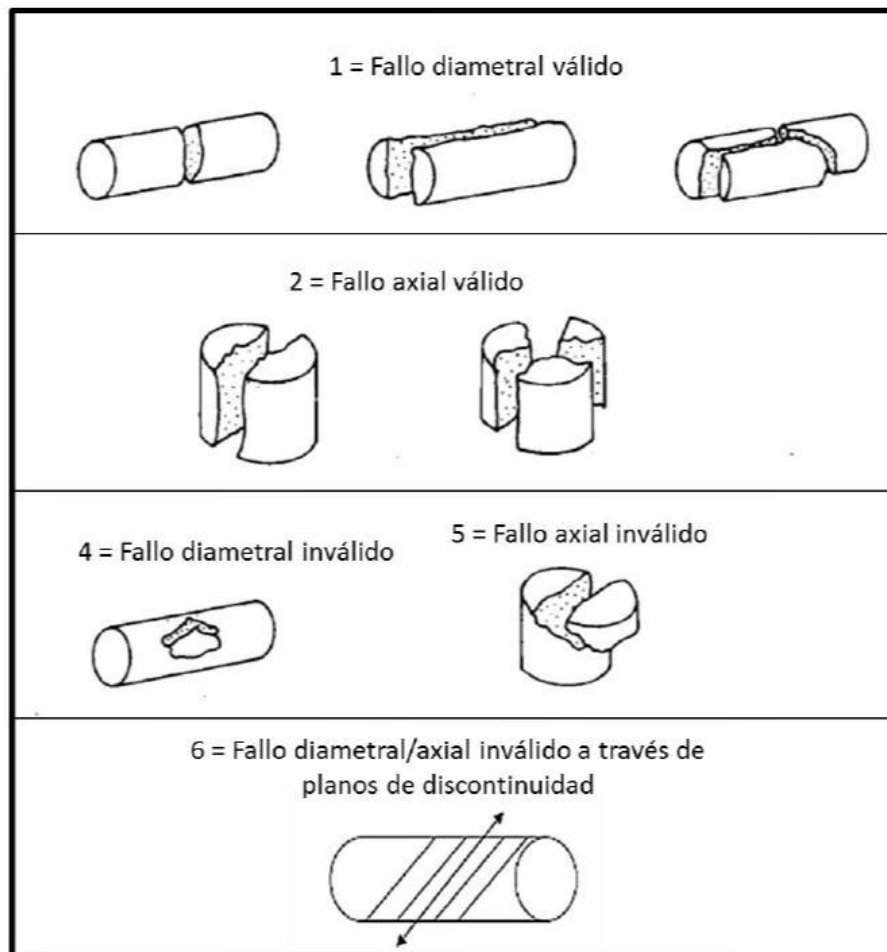
Tramo	Familias de Discontinuidades	Longitud [m]		Espaciamiento [m]		Ddip	Dip	Jr	Ja
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo				
Δ1-Δ2	1 Principal	4	6	0.5	1	118	80	3	2
	1 Secundaria	1	2	0.5	0.7	200	39	3	2
	2 Secundaria	3	4	0.6	0.8	25	71	3	2
Δ2-Δ3	1 Principal	6	8	1	1.5	158	80	2	2
	1 Secundaria	3	5	0.5	0.8	34	68	2	2
	2 Secundaria	6	9	0.3	0.6	170	29	2	4
Δ3-Δ4	1 Principal	3	5	0.4	0.7	42	63	3	1
	1 Secundaria	4	7	0.4	0.7	209	46	3	1
	2 Secundaria	2	3	0.3	0.6	156	48	3	2
Δ4-Δ5	1 Principal	7	10	0.8	1.2	146	88	3	3
	1 Secundaria	5	6	0.4	0.9	34	49	3	3
	2 Secundaria	1	3	0.2	0.5	301	54	3	3
Δ6-Δ7	1 Principal	1	2	0.3	0.5	4	64	3	3
	1 Secundaria	0.5	1	0.2	0.3	93	66	3	4
	2 Secundaria	1.5	2	0.3	0.6	130	84	3	3
	Aleatoria	0.5	0.8	0.2	0.3	132	54	3	3
Δ8-Δ9	1 Principal	2	3	0.3	0.4	171	60	3	3
	1 Secundaria	1	2	0.1	0.2	109	71	3	4
	2 Secundaria	0.5	1	0.3	0.4	272	50	3	4
	Aleatoria	0.4	0.5	0.1	0.2	193	67	3	3
Δ9-Δ10	1 Principal	7	9	0.5	2	154	67	3	2
	1 Secundaria	2	4	0.4	0.7	222	78	3	3
	2 Secundaria	1	2	0.1	0.3	265	62	3	3

#### 8.4. ENSAYOS DE CARGA PUNTUAL (PLT)

El Ensayo de Carga Puntual, PLT (“Point Load Testing”) se emplea para determinar la resistencia a la compresión simple en muestras de roca extraída de los núcleos de perforación o directamente de los afloramientos expuestos del

macizo rocoso. Básicamente este procedimiento consiste en romper una muestra axial o diametral que se pone entre dos puntas cónicas metálicas accionadas por una prensa hidráulica, para luego extraer del lector electrónico el dato de la máxima fuerza (KN) empleada para quebrar la roca. Con esta fuerza se determina el índice de resistencia a la carga puntual hallado (Mpa). Posteriormente se observa con detalle el tipo de fallo producido por el ensayo y se identifica de acuerdo con el diagrama de la *Figura 14*. Estos datos contribuirán para el estudio de la naturaleza del macizo rocoso.

**Figura 14.** Modos típicos de fallo para muestras válidas e inválidas.

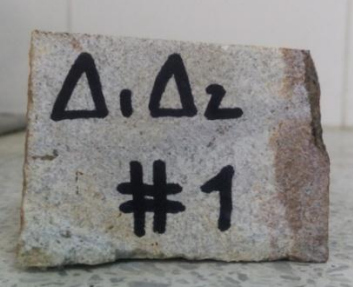

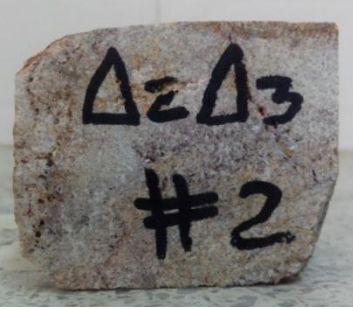
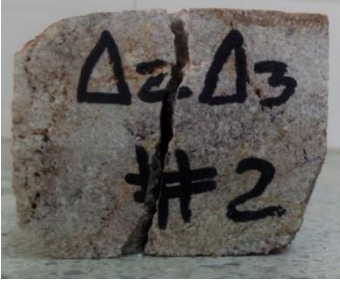










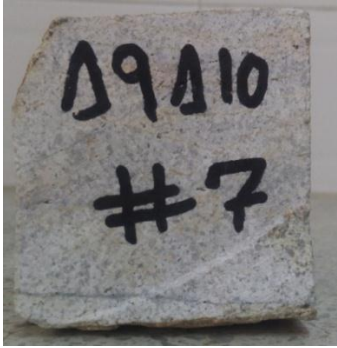
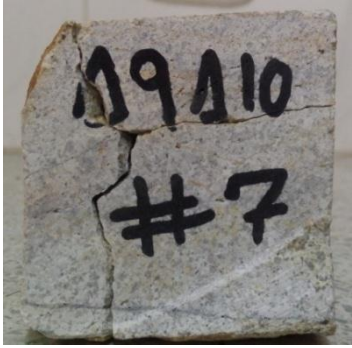
Fuente: Procedimiento de Carga Puntual V1 de Sociedad Minera de Santander.

Una vez recolectadas las muestras de roca en cada tramo se procedió a realizar los ensayos de carga puntual para determinar la cantidad de fuerza y el fallo que sufre cada muestra al quebrarse; de esta forma se obtuvo información que fue útil para determinar las propiedades mecánicas de la roca intacta. En algunos tramos no fue posible extraer muestra de roca ( $\Delta 5-\Delta 6$  y  $\Delta 7-\Delta 8$ ) ya que los afloramientos constituían de suelo residual con cubierta de capa vegetal.

Los resultados de estos ensayos se encuentran expresados en la tabla a continuación:

**Tabla 15.** Resultados de las pruebas de Ensayos de Carga Puntual.

# MUESTRA	MUESTRA ANTES DEL ENSAYO	MUESTRA DESPUÉS DEL ENSAYO	TIPO DE FALLO	FUERZA [KN]
1			2	7.47
2			2	4.35
3			2	11.53

4			2	5.74
5			2	23.16
6			2	3.34
7			6	20.79

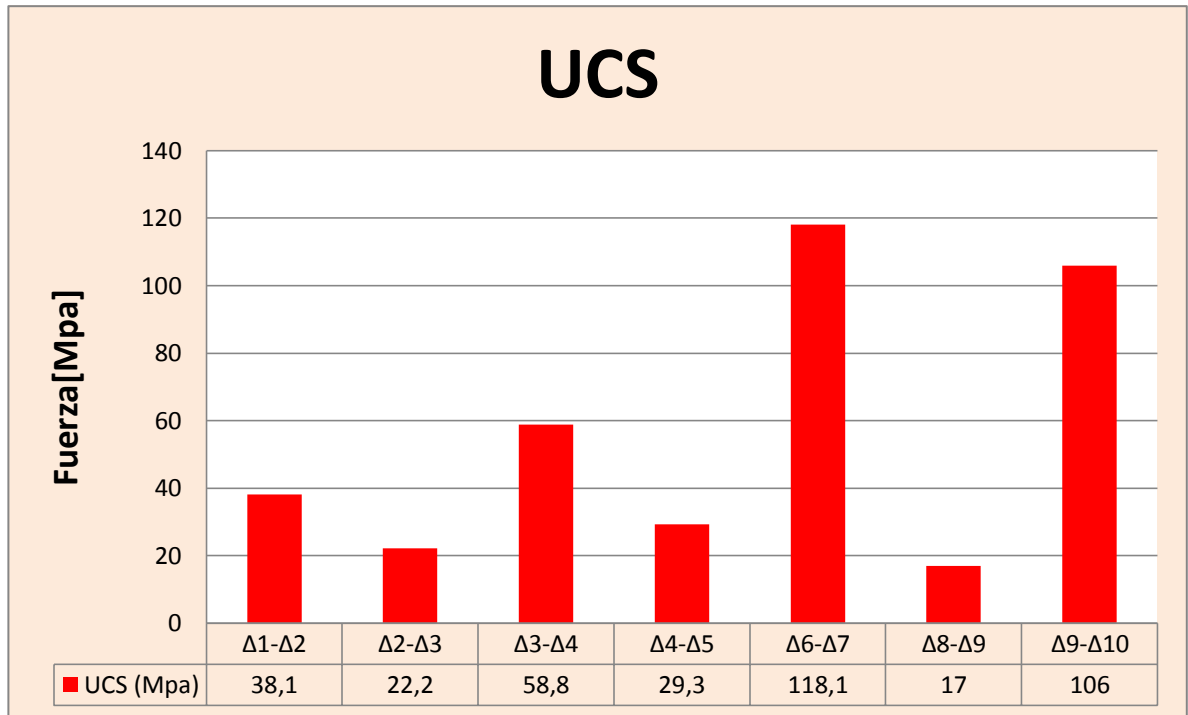
Obtenido los datos de cada muestra como las dimensiones, la fuerza necesaria para el quiebre (Gauge Reading) y el tipo de fallo que sufrió (Failure Code); se introdujeron estos valores a un archivo Excel suministrado por MINESA S.A.S (**Anexo C**) el cual calculó el valor del Índice de Resistencia de la Roca Intacta UCS. Estos valores de UCS se muestran en la *Tabla 16* serán tenidos en cuenta más adelante para el modelamiento con el software Slide.

**Tabla 16.** Resultados UCS calculados por el archivo Excel.

# Muestra	Tramo	UCS (Mpa)
1	$\Delta 1-\Delta 2$	38,1
2	$\Delta 2-\Delta 3$	22,2
3	$\Delta 3-\Delta 4$	58,8
4	$\Delta 4-\Delta 5$	29,3
5	$\Delta 6-\Delta 7$	118,1
6	$\Delta 8-\Delta 9$	17
7	$\Delta 9-\Delta 10$	106

De acuerdo a los resultados de UCS calculados, tenemos el siguiente grafico estadístico:

**Figura 15.** Gráfica de análisis estadístico de los valores UCS en las muestras de roca intacta.



Las muestras de los tramos Δ6-Δ7 y Δ9-Δ10 son las de valores más altos, seguido de las muestras de los tramos Δ1-Δ2 y Δ3-Δ4 de valores medios y por ultima las muestras de los tramos Δ2-Δ3, Δ4-Δ5 y Δ8-Δ9.

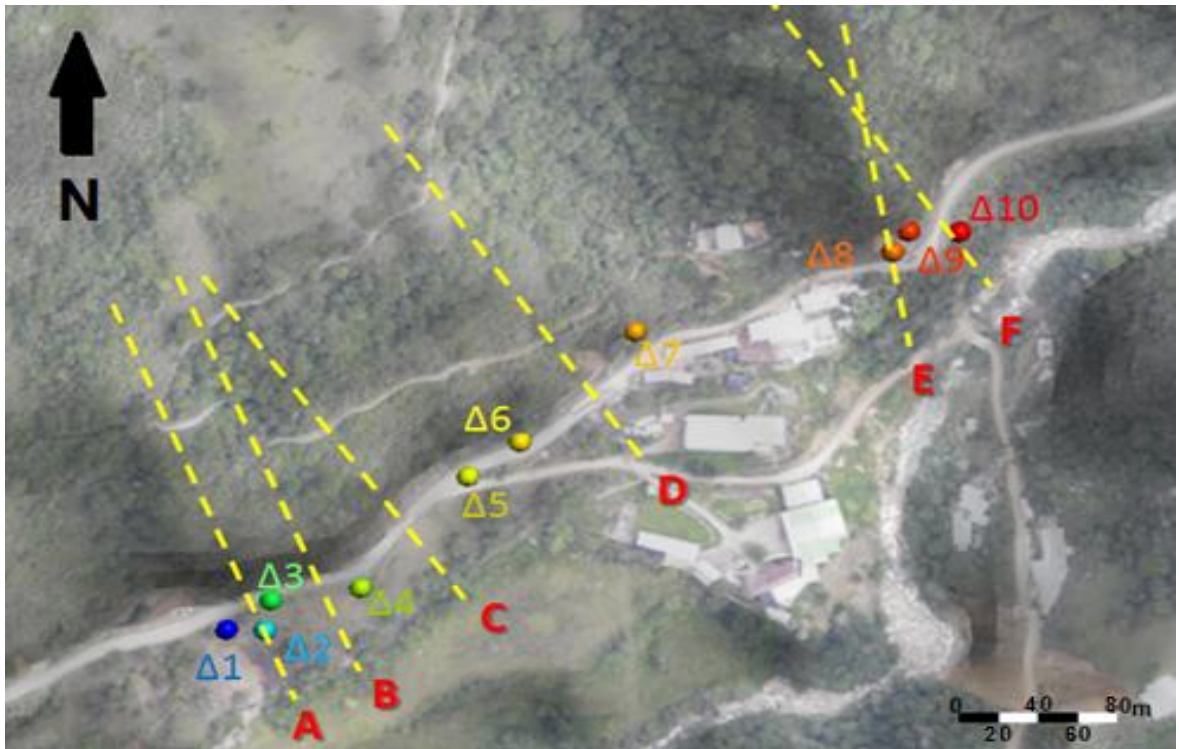
## **9. EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD POR MODELAMIENTO**

Los modelos son necesarios para contrarrestar la imposibilidad de acceder a la realidad de la cual tratan de ser un reflejo, lo más fiel posible. El modelamiento del talud tiene como objetivo brindar una comprensión del comportamiento del macizo rocoso. Estos modelamientos no debe ser solamente un reflejo de la realidad si no que en ellos debe aclarar con la mayor precisión posible los factores que conducen a la inestabilidad del talud.

### **9.1. MODELAMIENTO CON EL SOFTWARE SLIDE**

**9.1.1. DETERMINACIÓN DE LOS SECCIONES ANALIZAR:** Para el modelamiento en Slide primero se definieron las secciones de análisis: que se establecen como los perfiles topográficos de los taludes para evaluar su estabilidad. Estas secciones se trazaron con ayuda del programa leapfrog de tal forma que el corte de la sección fuera perpendicular a la vía (*Figura 16*).

**Figura 16.** Ubicación y disposiciones de las secciones de análisis Slide.



Fuente: MINESA S.A.S. Modificado por el Autor.

Para esto se definieron un total de 6 perfiles de análisis en el macizo, tratando de cada sección sea lo más representativa posible de acuerdo a las geometrías presentes y las orientaciones tanto de las caras del talud como de las estructuras con respecto a las mismas. En la *Tabla 17* se pueden apreciar dentro de cuales tramos del mapeo fue trazada cada sección. Los tramos  $\Delta 5-\Delta 6$ ,  $\Delta 7-\Delta 8$  no se incluyen ya que no se tomaron datos en el mapeo debido que estos tramos se encuentran cubiertos de vegetación y se constituyen de suelo residual como ya se había explicado anteriormente.

**Tabla 17.** Distribución de las secciones de análisis de Slide a lo largo de los tramos mapeados.

MAPEOS	SLIDE
$\Delta 1-\Delta 2$	Sección A
$\Delta 2-\Delta 3$	
$\Delta 3-\Delta 4$	Sección B
$\Delta 4-\Delta 5$	Sección C
$\Delta 6-\Delta 7$	Sección D
$\Delta 8-\Delta 9$	Sección E
$\Delta 9-\Delta 10$	Sección F

### 9.1.2. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS PARA ANALISIS DE ESTABILIDAD

**EN SLIDE:** Una vez trazadas las secciones a analizar, se procedió a determinar el factor de seguridad de cada una. Dado que este análisis se trata sobre un talud en vía permanente, el factor de seguridad a adoptar debe ser igual o superior a 1.5 en condiciones normales y 1.1 para condiciones sísmicas y saturadas.

Para hallar este factor de seguridad, se empleó el método de equilibrio límite, el cual se basa exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado

de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tiene en cuenta las deformaciones del terreno. Supone que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

Con base en los datos recolectados en la revisión bibliográfica, mapeos geotécnicos y ensayos de carga puntual, se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones para los análisis en Slide:

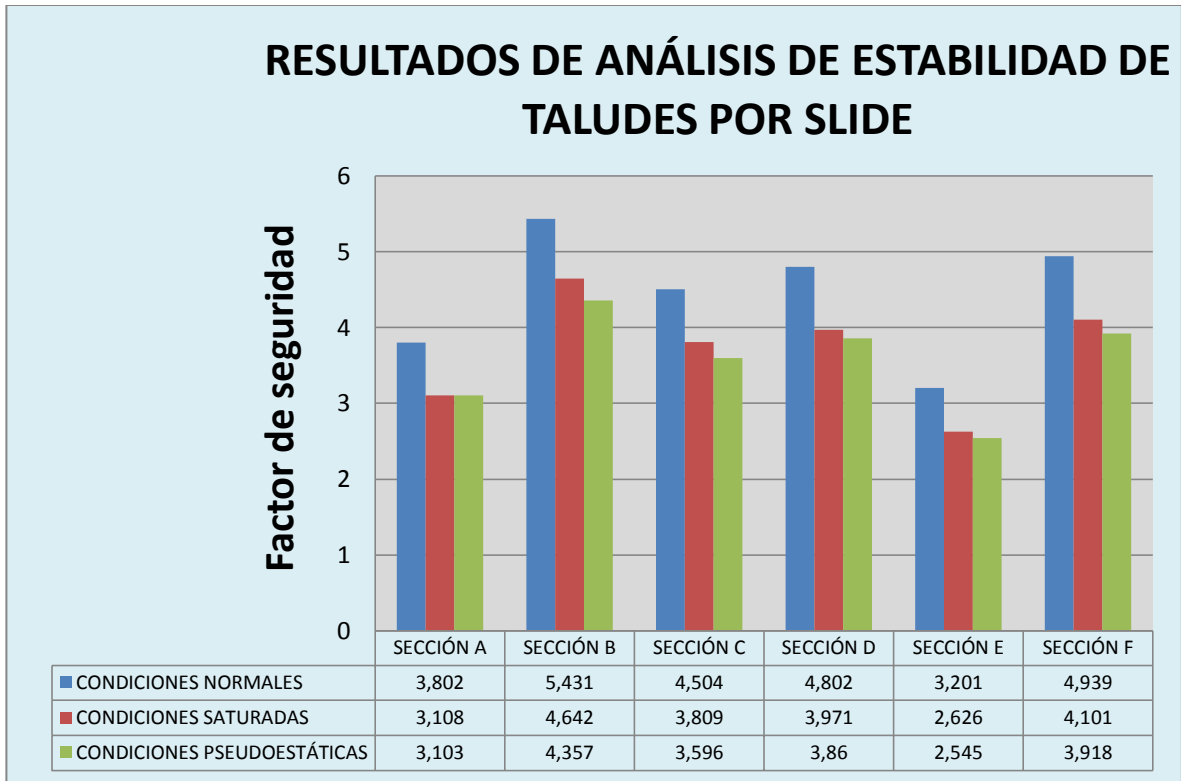
- El macizo rocoso está constituido únicamente por alaskita por lo que el valor de la constante de la roca intacta fue igual a 32.
- Para los análisis de estabilidad en condiciones sísmicas, se tuvo en cuenta que el sismo de diseño posee un periodo de 475 de retorno, y se tomó 1/2 de la aceleración máxima horizontal que según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 es de 0.25g, con sismicidad alta para esta zona. Por lo tanto para el coeficiente sísmico que se introdujo en el software fue de 0.13g como fuerza horizontal. Para el coeficiente sísmico vertical se tomó el valor de cero.
- Para el coeficiente  $R_u$  el valor tomado fue igual a 0.1 en los análisis de condiciones normales y sísmicas. Para los análisis en condiciones saturadas se tomó el coeficiente  $R_u$  igual a 0.25. Estos valores para los coeficientes  $R_u$  fueron suministrados por MINESA S.A.S. en base a estudios previos.
- Las propiedades del material variaron de una sección a otra. Para los valores UCS se tuvieron en cuenta los valores calculados con los ensayos de carga puntual que arrojó el archivo Excel, hay que ser cuidados al ingresar al transformar las unidades de MPa a KPa al introducir este dato al

software. Para los valores GSI se tomaron los valores recolectados en los mapeos geotécnicos (valor mínimo).

- Los demás datos de entrada para el software se encuentran especificados en el **Anexo D, Parte 1**.

**9.1.3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS SLIDE Y DISCUSIÓN:** Tomadas las consideraciones anteriores y teniendo como datos de entrada los parámetros mostrados en la Parte 1 del Anexo D; los análisis de estabilidad ejecutados por el software Slide, obtuvieron los siguientes factores de seguridad (**Anexo D, Parte 2,3 y 4**):

**Figura 17.** Gráfica de análisis del Factor de Seguridad en las tres condiciones: Normal, Saturada y Sísmica.



Con base en los resultados arrojados por el software Slide tenemos que:

- Todas las Secciones son estables, siendo la Sección E con los Factores de seguridad más bajos, pero a pesar de esto está muy por encima de los valores de mínimos de estabilidad en todas las condiciones analizadas. La sección B es la que presenta mayor estabilidad que las demás secciones.
- Un aspecto común en todas las secciones, es el mayor factor de seguridad se presenta en las condiciones normales, seguido de las condiciones saturadas y por último en las condiciones sísmicas las cuales presentan el factor de seguridad más bajo.

- La estabilidad de estas secciones puede deberse a al tipo de roca que se compone el macizo rocoso estudiado se encuentra compuesto por alaskita; un tipo de roca ígnea que debido a su mineralogía y textura hace que la roca sea de buena dureza y no se degrade fácilmente.

## 9.2. MODELAMIENTO CON EL SOFTWARE SWEDGE

**9.2.1. DETERMINACIÓN DE LOS SECCIONES ANALIZAR:** Para definir las secciones a analizar se tuvieron en cuenta las secciones que se establecieron en el modelamiento con Slide. Con el objetivo de tener un mejor análisis de cuñas en Swedge, se combinaron secciones consecutivas, exceptuando la Sección A, esto se hizo con el fin de obtener mayor número de datos estructurales por sección. Las secciones a analizar en Swedge se encuentran resaltadas en la *Tabla 18*.

**Tabla 18.** *Tabla donde se relacionan los tramos mapeados con las Secciones de análisis en Slide y Swedge.*

MAPEOS GEOTÉNICOS	ANÁLISIS SLIDE	ANÁLISIS SWEDGE
$\Delta 1-\Delta 2$	Sección A	Sección A
$\Delta 2-\Delta 3$		

$\Delta 3-\Delta 4$	Sección B	Sección BC
$\Delta 4-\Delta 5$	Sección C	Sección CD
$\Delta 6-\Delta 7$	Sección D	Sección DE
$\Delta 8-\Delta 9$	Sección E	Sección EF
$\Delta 9-\Delta 10$	Sección F	

*Nota:* En amarillo se resalta las Secciones de Análisis para cuñas en Swedge.

Debido al grado de fracturamiento de la roca y a la observación de las orientaciones de las discontinuidades; como un análisis general, se supondrá que se presentan roturas en cuña, es decir que los bloques que caerán, serán definidos por la intersección de dos discontinuidades A y B. (*Fotografía 13*)

**Fotografía 13.** Afloramiento del talud estudiado.



*Nota: Se evidencia el gran alto grado de fracturamiento en el macizo, estas discontinuidades favorecen la formación de cuñas.*

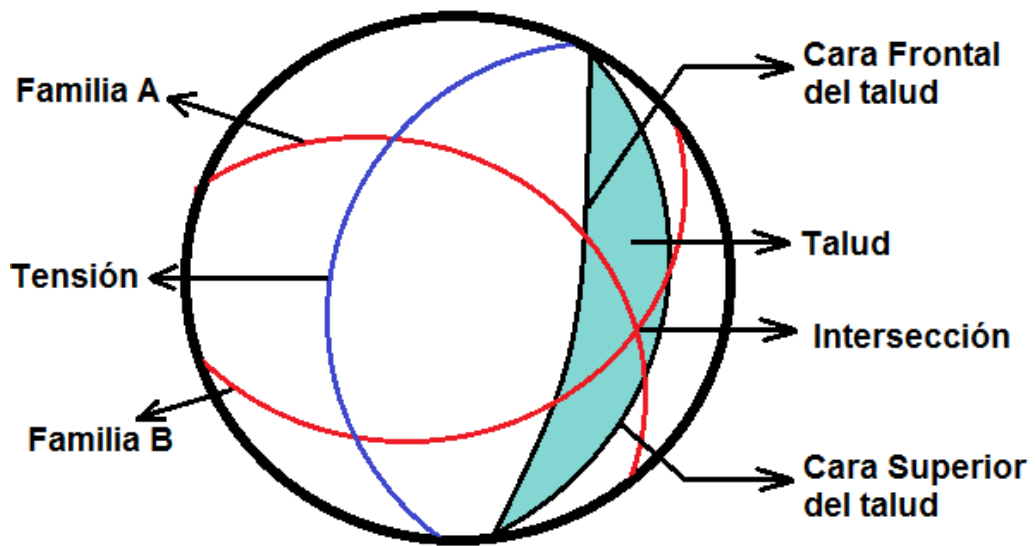
**9.2.2. IDENTIFICACIÓN DE CUÑAS CON EL SOFTWARE DIPS:** Ya habiendo definido las secciones a analizar, se procedió a hacer la identificación de cuñas con ayuda del Software DIPS, para esto se graficaron los datos estructurales tomados en campo, estos datos comprenden las discontinuidades de cada sección (*Tabla 14*), junto con los datos de la cara frontal y superior para cada talud (*Tabla 19*).

**Tabla 19.** Datos del talud para cada sección.

SECCIÓN	CARA FRONTAL TALUD		CARA SUPERIOR TALUD		ALTURA TALUD [m]
	Dip	Ddip	Dip	Ddip	
A	61	150	22	150	23
BC	61	150	25	150	26
CD	65	150	21	150	23
DE	51	150	21	150	27
EF	57	150	24	150	27

Las fallas en cuña se presentan cuando la intersección entre las familias A y B ocurre dentro de la media luna del talud, y una tercera familia actúa como grieta de tensión cortando a las familias A y B por fuera de la media luna. (Figura 18).

**Figura 18.** Formación de una cuña en la proyección estereográfica.



En el **Anexo D** se muestran la representación de los datos estructurales en DIPS para cada sección. Estos resultados fueron los siguientes para cada sección:

- **Sección A:** Para esta sección se formaron dos cuñas.

**Tabla 20.** Cuñas identificadas en la sección A con el software DIPS.

Sección	# Cuña	Tipo	Dip	Ddip
A	1	Joint Set 1	29	170
		Joint Set 2	80	118
		Upper Face	22	150
		Slope Face	61	150
		Tensión Crack	80	158
	2	Joint Set 1	39	200
		Joint Set 2	80	118
		Upper Face	22	150
		Slope Face	61	150
		Tensión Crack	80	158

- **Sección BC:** Para esta sección se formaron dos cuñas

**Tabla 21.** Cuñas identificadas en la sección BC con el software DIPS.

Sección	# Cuña	Tipo	Dip	Ddip
BC	1	Joint Set 1	48	156
		Joint Set 2	54	301
		Upper Face	25	150
		Slope Face	61	150
		Tensión Crack	49	34
	2	Joint Set 1	48	156
		Joint Set 2	54	301
		Upper Face	25	150
		Slope Face	61	150
		Tensión Crack	88	146

- **Sección CD:** Para esta sección se formaron cuatro cuñas.

**Tabla 22.** *Cuñas identificadas en la sección BC con el software DIPS.*

Sección	# Cuña	Tipo	Dip	Ddip
CD	1	Joint Set 1	54	301
		Joint Set 2	84	130
		Upper Face	21	150
		Slope Face	65	150
		Tensión Crack	88	146
	2	Joint Set 1	54	301
		Joint Set 2	84	130
		Upper Face	21	150
		Slope Face	65	150
		Tensión Crack	64	4
	3	Joint Set 1	54	301
		Joint Set 2	84	130
		Upper Face	21	150
		Slope Face	65	150
		Tensión Crack	49	34
	4	Joint Set 1	54	301

		Joint Set 2	84	130
		Upper Face	21	150
		Slope Face	65	150
		Tensión Crack	66	93

- **Sección DE:** Para esta sección se formaron nueve cuñas.

**Tabla 23.** Cuñas identificadas en la sección DE con el software DIPS.

Sección	# Cuña	Tipo	Dip	Ddip
DE	1	Joint Set 1	50	272
		Joint Set 2	54	132
		Upper Face	21	150
		Slope Face	51	150
		Tensión Crack	60	171
	2	Joint Set 1	50	272
		Joint Set 2	54	132
		Upper Face	21	150
		Slope Face	51	150
		Tensión Crack	67	193

	3	Joint Set 1	50	272
		Joint Set 2	54	132
		Upper Face	21	150
		Slope Face	51	150
		Tensión Crack	64	4
	4	Joint Set 1	64	4
		Joint Set 2	60	171
		Upper Face	21	150
		Slope Face	51	150
		Tensión Crack	54	132
	5	Joint Set 1	64	4
		Joint Set 2	60	171
		Upper Face	21	150
		Slope Face	51	150
		Tensión Crack	66	93
	6	Joint Set 1	64	4
		Joint Set 2	60	171
		Upper Face	21	150
		Slope Face	51	150

		Tensión Crack	67	193
	7	Joint Set 1	64	4
		Joint Set 2	60	171
		Upper Face	21	150
		Slope Face	51	150
		Tensión Crack	71	109
	8	Joint Set 1	64	4
		Joint Set 2	60	171
		Upper Face	21	150
		Slope Face	51	150
		Tensión Crack	84	130
	9	Joint Set 1	64	4
		Joint Set 2	60	171
		Upper Face	21	150
		Slope Face	51	150
		Tensión Crack	50	272

- **Sección EF:** Para esta sección se formaron cuatro cuñas.

**Tabla 24.** Cuñas identificadas en la sección EF con el software DIPS

Sección	# Cuña	Tipo	Dip	Ddip
EF	1	Joint Set 1	62	265
		Joint Set 2	71	109
		Upper Face	24	150
		Slope Face	57	150
		Tensión Crack	67	157
	2	Joint Set 1	62	265
		Joint Set 2	71	109
		Upper Face	24	150
		Slope Face	57	150
		Tensión Crack	60	171
	3	Joint Set 1	62	265
		Joint Set 2	71	109
		Upper Face	24	150
		Slope Face	57	150
		Tensión Crack	67	193
	4	Joint Set 1	62	265

		Joint Set 2	71	109
		Upper Face	24	150
		Slope Face	57	150
		Tensión Crack	78	222

### 9.2.3. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS PARA ANALISIS DE ESTABILIDAD

**EN SWEDGE:** Con el software Swedge se realizó el análisis de estabilidad para cada una de las cuñas identificadas y de esta forma determinar su factor de seguridad. Al igual que en el análisis en Slide, para considerar las cuñas estables el factor de seguridad debe ser igual o superior a 1.5 en condiciones normales y 1.1 para las condiciones sísmicas.

Para determinar el factor de seguridad, se empleó el método determinístico el cual considera eventos reales de los cuales se conocen o se suponen las condiciones en que se encuentra el talud, indicando si este es estable o no.

Para los análisis estabilidad de cuñas se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Los datos de Dip, Dip direction y altura del talud mostrados en la *Tabla 18*.
- La empresa MINESA S.A.S proporcionó información acerca de la cohesión, el ángulo de fricción y el peso unitario de la roca, estos valores se encuentran representados en la *Tabla 25*. Estos datos fueron hallados con base en estudios anteriores hechos por la empresa.

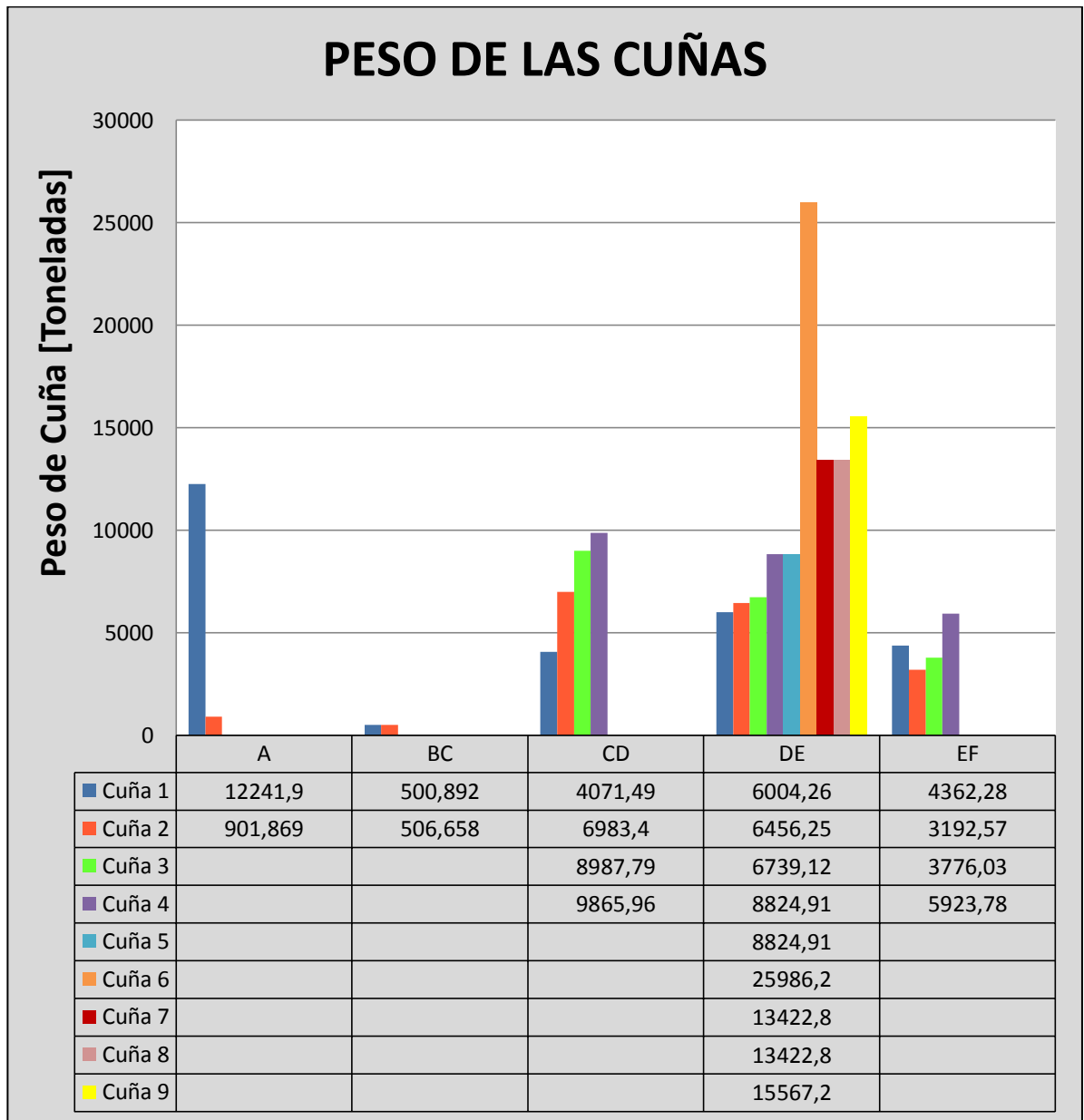
**Tabla 25.** Valores de *cohesión, ángulo de fricción y peso unitario.*

PARAMETRO	VALOR
Cohesión [t/m <sup>2</sup> ]	0
Ángulo de Fricción [deg]	30
Peso Unitario [t/m <sup>3</sup> ]	2.7

- Las longitudes de la grieta de tensión (*Trace lenght*) fueron tomadas de los datos estructurales de la *Tabla 14* identificando la información de la grieta de tensión según la sección a analizar se localizará en un tramo determinado, para este parámetro se tomó la máxima medida de persistencia de la discontinuidad.
- Se empleó el mismo valor de coeficiente sísmico horizontal que en Slide (0.13).

**9.2.4. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS SWEDGE Y DISCUSIÓN:** De acuerdo con toda la información dada, los modelos para los análisis de cuñas en Swedge que se aprecian en el Anexo F que arrojaron los siguientes resultados:

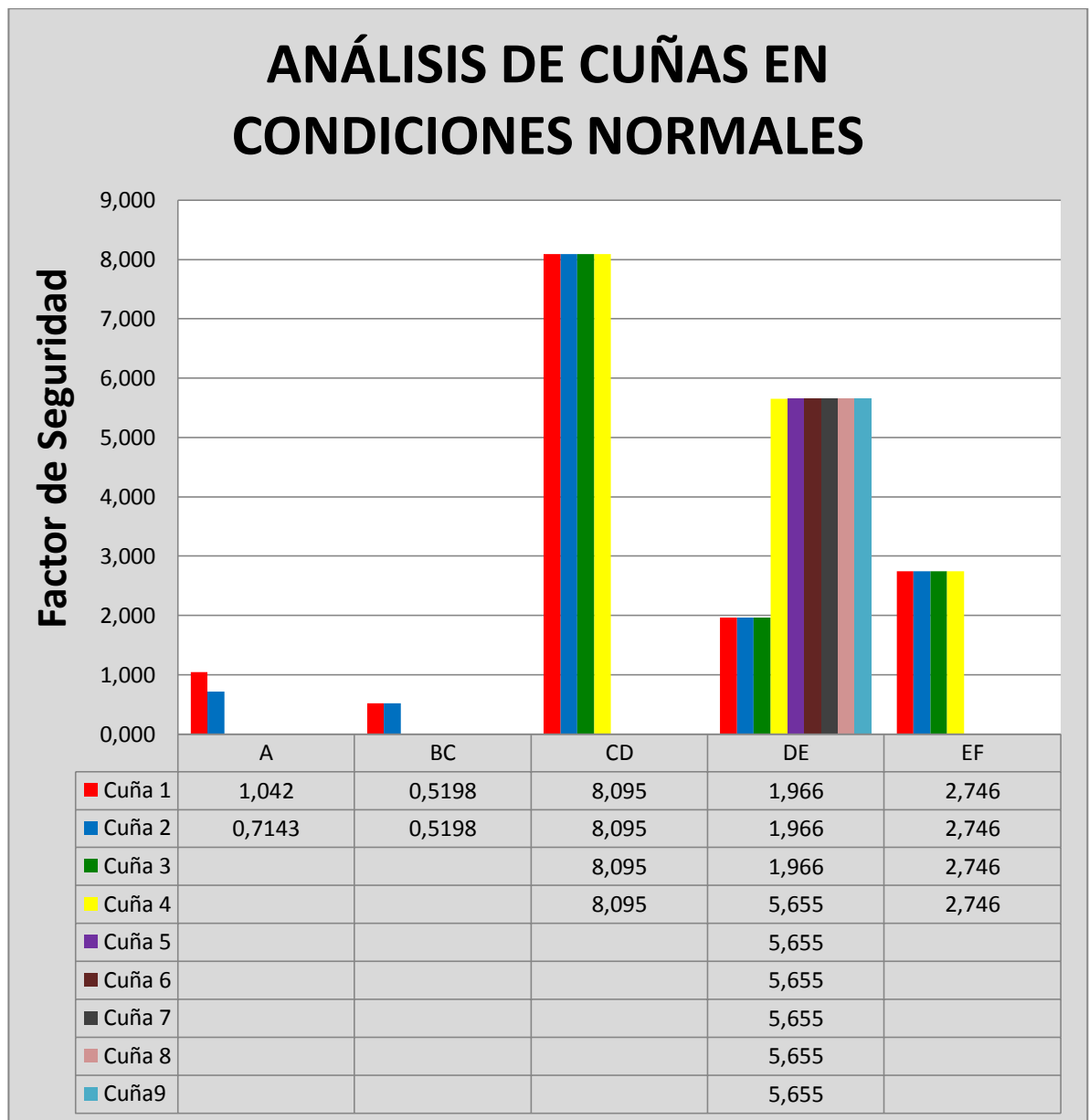
**Figura 19.** Gráfico estadístico del peso de las cuñas.



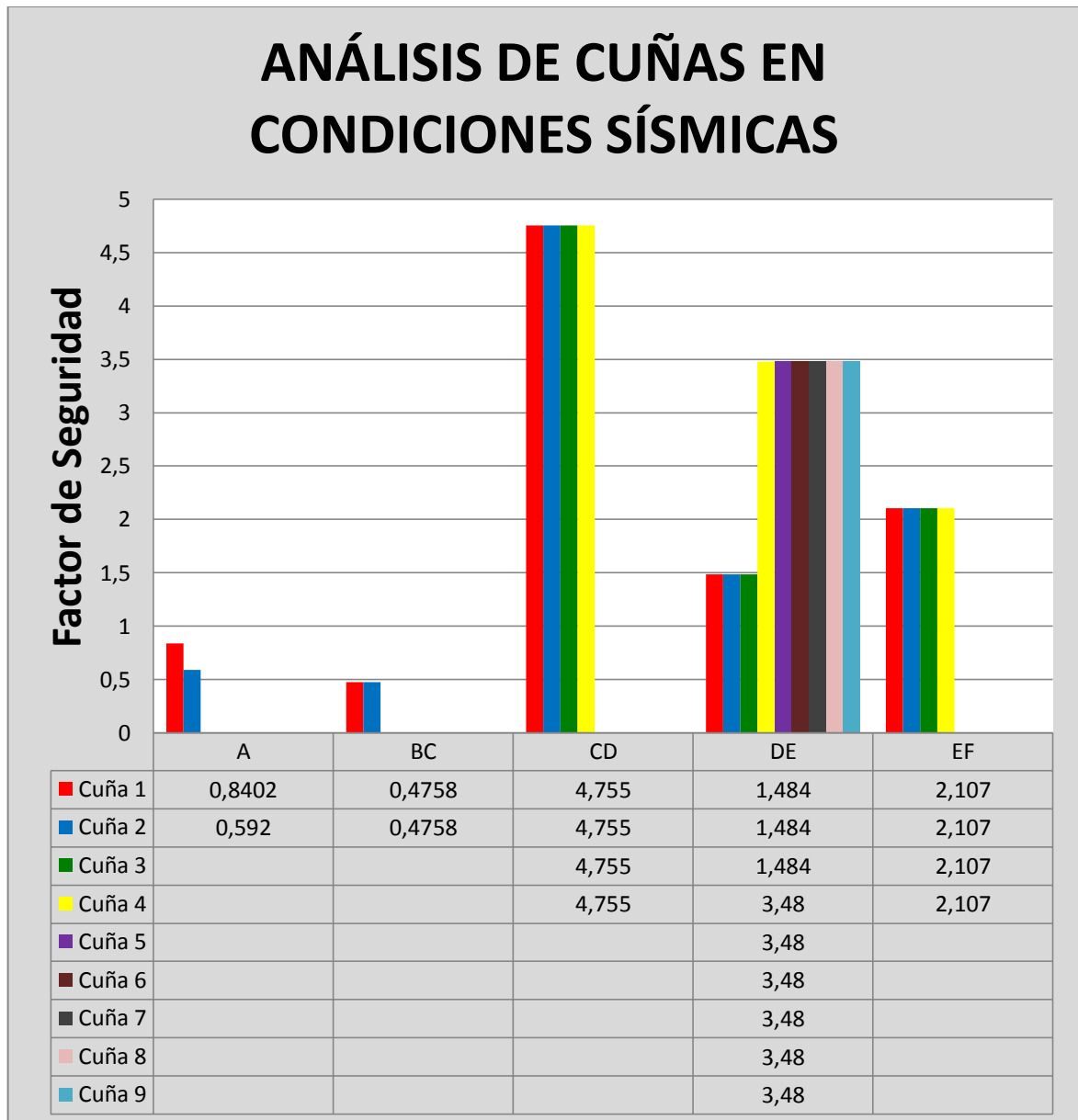
De acuerdo a la figura anterior se puede dar una idea de las dimensiones de cada cuña observando el peso. La cuña 6 de la sección DE presenta el mayor peso (25986.2 Tn) y la cuña 1 de la sección BC presenta el menor peso (500.892 Tn). El promedio de peso que presentan las cuñas es de 7931.53 Tn.

Para condiciones normales y sísmicas, los análisis en Swedge mostraron los siguientes resultados:

**Figura 20.** Gráfica estadística del factor de seguridad de las cuñas en Condiciones Normales.



**Figura 21.** Gráfica estadística del factor de seguridad de las cuñas en Condiciones Sísmicas.



De acuerdo a lo observado en *las Figura 20 y 21* se infiere que:

- ✓ Para todas las cuñas el Factor de Seguridad disminuye en las condiciones sísmicas

- ✓ La Sección CD es la más estable, donde sus cuñas presentan con un factor de seguridad de 8.095 en condiciones Normales, y un factor de seguridad 4.755 en condiciones sísmicas, mientras que las Secciones A y BC son inestables en condiciones normales y sísmicas ya que sus cuñas presentan un factor de seguridad inferior a 1.5 y 1.1 respectivamente (*Tabla 26*) por lo que trae como consecuencia que sea más susceptible a la caída de bloques de rocas en presencia de cualquier tipo de fuerza externa, principalmente sismos. Debido a este factor de seguridad tan bajo se sugiere medidas de estabilización estas cuñas.

**Tabla 26.** *Cuñas Inestables.*

Sección	# Cuña	Factor de Seguridad	
		Condiciones Normales	Condiciones Sísmicas
A	1	1,042	0,8402
	2	0,7143	0,592
B	1	0,5198	0,4758
	2	0,5138	0,4758

- ✓ En muchos casos se observó que se forman diferentes cuñas variando solo el dato de la grieta de tensión (Tension Crack), de tal forma que la geometría de la cuñas son similares y el factor de seguridad sigue sin alterarse tanto en las Condiciones Normales como en las condiciones Sísmicas.

## 10. ESTABILIZACION DE CUÑAS INESTABLES

Como ya se había expuesto los factores de seguridad más bajos se presentan en las Secciones A y BC, por lo que presentan mayor riesgo de fallar. Para minimizar este riesgo y aumentar el factor de seguridad se sugirió la adición de pernos de anclaje como soportes, estos pernos tienen un ancho de 32 mm y una capacidad de carga de 34 toneladas. Este tipo de pernos son empleados en la MINESA S.A.S para sus trabajos.

La estabilización de las cuñas arrojaron los siguientes resultados (**Anexo G**) resumidos en la siguiente tabla:

**Tabla 27.** Factor de seguridad de las cuñas antes y después de su estabilización.

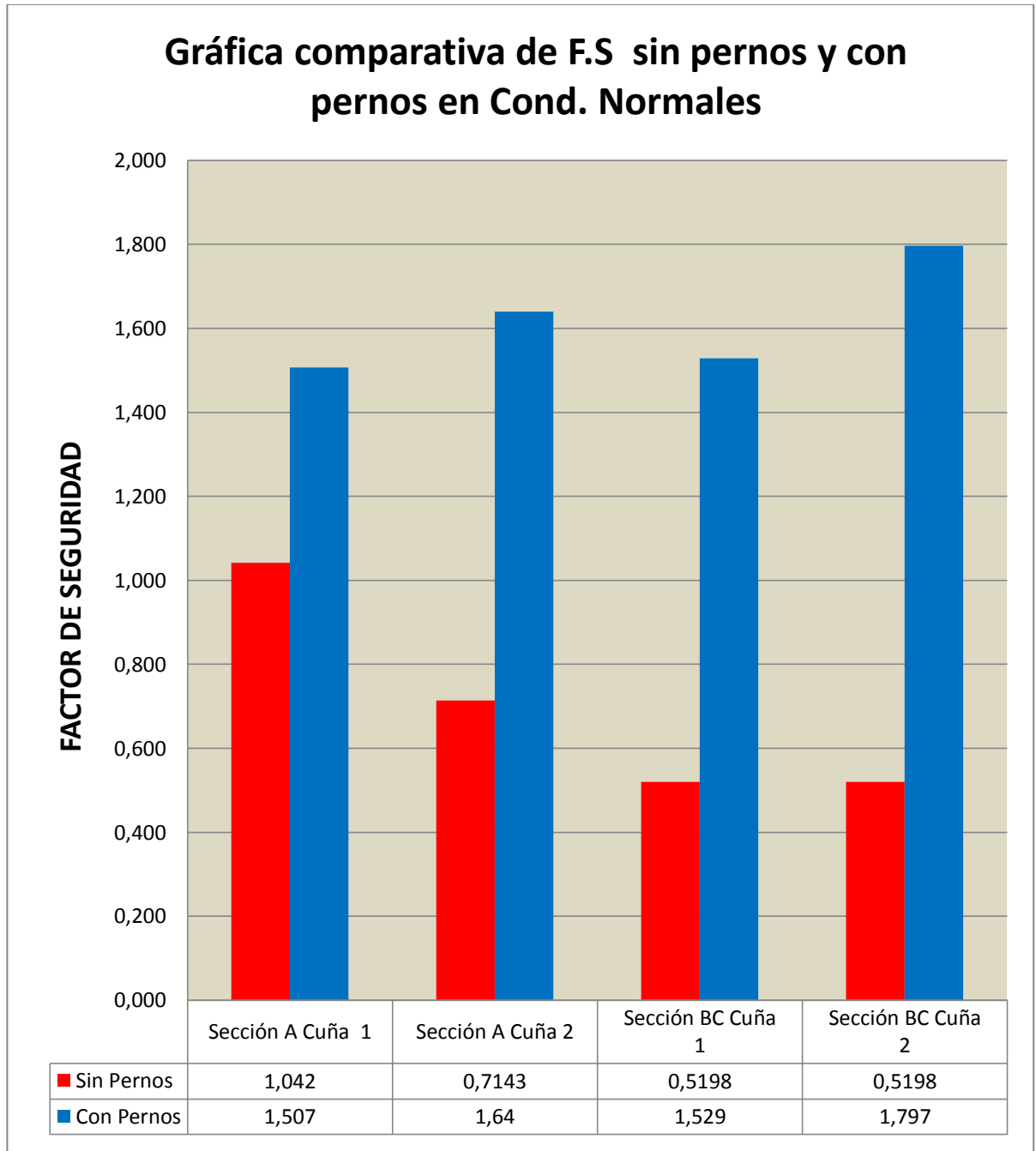
Sección	# Cuña	Factor de Seguridad			
		Condiciones Normales		Condiciones Sísmicas	
		Sin Pernos	Con Pernos	Sin Pernos	Con Pernos
A	1	1,042	<b>1,507</b>	0,8402	<b>1,143</b>
	2	0,7143	<b>1,64</b>	0,592	<b>1,216</b>
B	1	0,5198	<b>1,529</b>	0,4758	<b>1,281</b>
	2	0,5198	<b>1,797</b>	0,4758	<b>1,484</b>

- **Sección A- Cuña 1:** Debido al gran peso y dimensiones que presenta esta cuña, se necesitó una compleja red de 51 pernos para su estabilización, estos pernos contaron con longitudes que variaban desde los 4 a 13 metros. Una vez estabilizada la cuña, arrojó un factor de seguridad de 1.502 para condiciones normales y 1.140 para condiciones sísmicas.

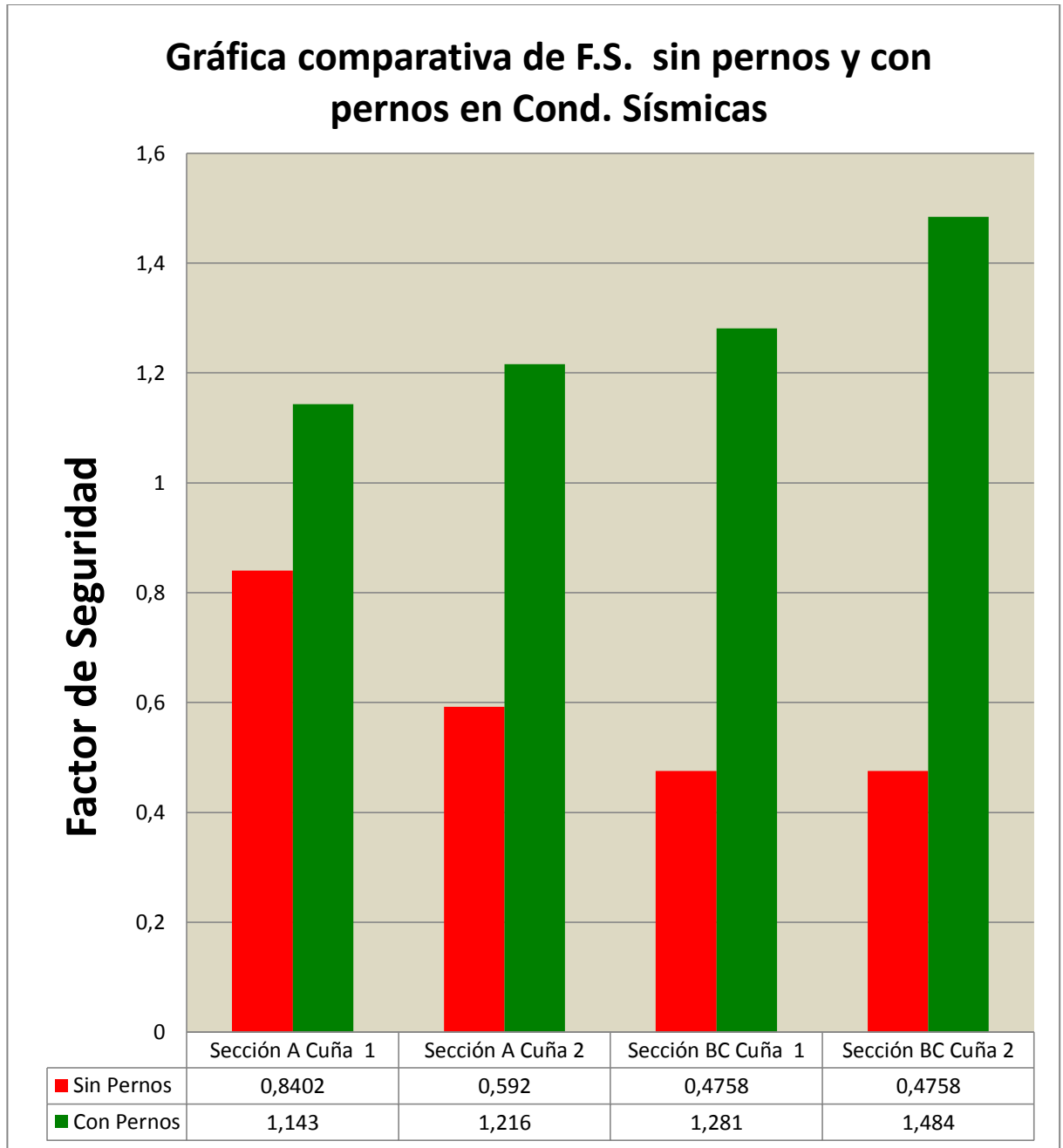
- **Sección A- Cuña 2:** Esta cuña siendo más liviana que la cuña anterior requirió de 9 pernos de anclaje con longitudes que variaban de los 3 hasta los 8 metros. La cuña estabilizada arrojó factor de seguridad de 1.604 para condiciones normales y 1.216 para condiciones sísmicas.
- **Sección BC- Cuña 1:** Para esta delgada cuña se empleó 11 pernos para su estabilización. Los pernos tienen longitudes que varían de 1 a 2 metros. La cuña estabilizada arrojó factor de seguridad de 1.529 para condiciones normales y 1.281 para condiciones sísmicas.
- **Sección BC- Cuña 1:** Con geometría muy similar a la otra cuña de esta misma sección, se empleó 8 pernos para su estabilización., con pernos de 1 a 4 metros. La cuña estabilizada arrojó factor de seguridad de 1.797 para condiciones normales y 1.484 para condiciones sísmicas.

Una forma de analizar mejor los resultados de estabilización es observando las *Figuras 22 y 23* que muestran para cada cuña el aumento del factor de seguridad antes y después de la instalación de los pernos de anclaje, se evidencia como la cuña 2 de la Sección BC tiene un gran aumento del factor de seguridad mientras que para cuña 1 de la sección A alcanza aprietamente a superar el factor de seguridad mínimo de estabilización (1.5 para condiciones normales y 1.1 para condiciones sísmicas) ,esto puede deberse al peso que tienen(*Figura 19*), donde la cuña 2 de la sección BC tiene pesa aproximadamente una cuarta parte del peso de la cuña 1 de la Sección A.

**Figura 22.** Gráfica comparativa del Factor de seguridad de cuñas antes y después de su estabilización en condiciones normales.



**Figura 23.** Gráfica comparativa del Factor de seguridad de cuñas antes y después de su estabilización en condiciones sísmicas.



## 11. CONCLUSIONES

1. Para la zona estudiada, se identificaron los siguientes factores que alteran estabilidad del talud:
  - ✓ La geología estructural que se presenta es el principal factor de inestabilidad, lo que ha producido un macizo rocoso con elevado grado de fracturación dando lugar a varias familias de discontinuidades cuya interrelación es desfavorable respecto al talud considerado.
  - ✓ El clima donde se presentan ciclos estacionales de temperatura y humedad que causa una aceleración en los procesos de meteorización en la roca de macizo.
  - ✓ La infiltración del agua en el talud que afecta directamente a la cohesión y aumenta el peso de las rocas que componen el talud.
  - ✓ Las pendientes abruptas que favorece los deslizamientos de bloques de roca debido a los efectos gravitatorios.
  - ✓ La presencia de vegetación parte superior del macizo, donde sus raíces causan negativo efecto mecánico en las discontinuidades, provocando deslizamientos de bloques de roca.
  - ✓ Las pequeñas vibraciones producidas por el tráfico carros particulares y transporte de carga pesada es un factor que al

combinarlo con algún otro de los otros factores de los ya citados pueden generar la inestabilidad de cuñas a largo plazo.

2. A pesar de que haya similitudes entre los taludes, cada uno de estos es un caso específico porque la presencia de agua subterránea, orientación de las discontinuidades y otros aspectos que deben ser tratados detalladamente para comprender su comportamiento y dar las respectivas medidas de estabilización.
3. El cálculo de la estabilidad de talud en cada una de las secciones, con uso del software Slide, aplicando el método de equilibrio límite, muestran que los taludes son estables mientras que en el cálculo de estabilidad de cuñas en el software Slide, con el método determinístico muestra que se presentan 4 cuñas inestables donde fue necesario hacer la estabilización con pernos de anclaje.
4. La capacitación en geotecnia previa a la fase de campo fue fundamental ya que permitió obtener un mejor desarrollo para la recolección de datos de campo y laboratorio; de esta forma se obtuvo una satisfactoria clasificación de macizo rocoso. Esta capacitación se hizo a través de lecturas suministradas por MINESA, manejo de los equipos de laboratorio y reconocimiento de los parámetros a través de logueos geotécnicos en fotografías y en físico.

## 12. RECOMENDACIONES

1. El macizo rocoso estudiado se encuentra a en cercanías a la falla La Baja, de tal forma que un movimiento de esta falla puede provocar la desestabilización, por lo que es pertinente la instalación de un sistema de monitoreo que registre los movimientos que afecten la estabilidad de macizo y adoptar a tiempo las respectivas medidas para prevenir desastres.
2. Se recomienda elaborar otros tipos de ensayos geotécnicos para determinar características de las cuales no se tiene conocimiento o complementar la información suministrada de otros ensayos. Estos ensayos pueden ser por ejemplo compresión uniaxial, sondeos en profundidad, corte directo, humedad, granulometría etc. Que servirán para realizar una mejor caracterización de macizo rocoso.
3. La ingeniería geotécnica es una rama de la geología que ha cobrado importancia en nuestro mundo moderno ya que cada vez más se planifican construcciones en terrenos complejos por lo que es necesario hacer los previos estudios de la calidad de suelo y roca. Es por esto que es recomendable que la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander incluya de manera esta asignatura en su plan de estudios como una materia requisito para alcanzar el título profesional.
4. Se recomienda utilizar los pernos de anclaje como primera opción, puesto que esta medida tiene las siguientes ventajas:
  - ✓ Bajo costo. Las varillas de acero son más económicas que los torones o cables.
  - ✓ La instalación de los pernos es relativamente rápida.

- ✓ Se utilizan equipos livianos. Los pernos se construyen utilizando equipos convencionales de perforación e inyección, y pueden ser utilizados en sitios con difícil acceso y espacio limitado.
  - ✓ Si por alguna razón el perno se esfuerza, la carga se redistribuye a los pernos vecinos.
5. Realizar un estudio para analizar los volúmenes y dimensiones de cada cuña, esto será de gran importancia a la hora de instalar los pernos de anclaje.

## BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA DE CALIFORNIA. (Consultado en Mayo de 2017). Disponible en: [http://www.california-santander.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.california-santander.gov.co/informacion_general.shtml).

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. (Colombia). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente (NSR-10). Bogotá, 2010

BIENIAWSKI. Z.T. The geomechanics classification in rocks. Engineering applications. Montreux.1974.

BIENIAWSKI, Z.T. Rock Mass Classification in Rock Engineering.Exploration for Rock Engineering, Johannesburg 1989. Ed. Z. T. Bieniawski, A.A.Balkema,.

CASTILLA DUARTE, Eileen y CALDERON TURIZO, Luis. Estabilización del talud de la vía Vadoreal-Gámbita troncal Central – Santander. Universidad industrial de Santander, tesis de ingeniería civil. Bucaramanga, 2012.

CLAVIJO, Jairo y ROYERO, José. Memoria Explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Santander en escala 1:300.000. INGEOMINAS, 2001. 91p.

CONTRERAS FERNANDEZ, Gustavo. Contextualización geológica de la brecha hidrotermal Auroargentífera en inmediaciones de la mina la baja (distrito Minero de California-Vetas, Santander). Tesis pregrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga 2010.

DIPS, Plotting, Analysis and Presentation of Structural Data Using Spherical Projection Techniques User's Guide 1989 - 2002 Rocscience Inc.

DUQUE ESCOBAR, Gonzalo. Manual de Geología para Ingenieros. Universidad Nacional de Colombia. (Consultado en mayo de 2017). Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>

GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis y otros. Ingeniería Geológica. Pearson Education S.A. Madrid. 2002.

HERRERA RODRIGUEZ, Fernando. Guía de cálculo de estabilidad de taludes rocosos. Madrid. 2000

HOEK E. y BROWN E. T. Estimación de la Resistencia de Macizos Rocosos en la Práctica. London. (1988)

MANTILLA, Luis. et al. Nuevas evidencias sobre el magmatismo mioceno en el distrito minero de Vetas-California (macizo de Santander, cordillera oriental, Colombia). Boletín Geológico 2011.

MENDOZA, H. y JARAMILLO, L. Geología y Geoquímica del Área de California, Santander. Boletín de Geológico INGEOMINAS, volumen 22, No. 2. Bucaramanga 1979.

MORALES, Mario Orlando. Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en yacimiento Franke, Universidad de Chile, Facultad de Ingeniería de Minas, Santiago de Chile, 2009.

RAMÍREZ OYANGUREN, Pedro y ALEJANO MONGE, Leandro. Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. 2004. Madrid, España.

RODRÍGUEZ, José MORALES Dante y PAREDES Luisa. Evaluación de la Estabilidad de Taludes en la Mina Lourdes. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Facultad de Ingeniería de Minas. Tacna, Perú. 2013.

SOCIEDAD MINERA DE SANTANDER, S.A.S. Manual de Logueo de Núcleos de Perforación V2, Proyecto Soto Norte 2015,

SUÁREZ DÍAZ, Jaime Análisis y modelación de deslizamientos. (Recuperado en Julio del 2017). Disponible en: <http://www.erosion.com.co/analisis-y-modelacion-de-deslizamientos/133-analisis-de-estabilidad-modelos-deterministicos.html>.

SUÁREZ D, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, (Consultado en mayo de 2007) Disponible en: <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales.html>

SIIDE. Tutorial y manejo. Disponible en: [www.rocscience.com/help/slide/webhelp7/Slide.htm#tutorials/Slide\\_Tutorials.htm](http://www.rocscience.com/help/slide/webhelp7/Slide.htm#tutorials/Slide_Tutorials.htm)

SWEDGE, Probabilistic analysis of the geometry and stability of surface wedges;  
User's Guide\_ 1991 Rocscience Inc.

WARD, D.E. *et al.* Memoria Explicativa: Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13  
Pamplona. INGEOMINAS, 1973.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A: MAPEOS GEOTÉCNICOS**

SOCIEDAD MINERA DE SANTANDER S.A.S.		VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO RMR (BIENIAWSKI, 1989) Y Q (Barton, 1993)				DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA	
MAPEO GEOTECNICO							
<b>DELTA</b>	$\Delta 1-\Delta 2$	COORDENADAS $\Delta 1$		PUNTO EN TUNEL	X		
NIVEL	X	ESTE	1'125.743	METEORIZACION	2		
TUNEL	X	NORTE	1'304,670	AZIMUT DE LA PARED	X		
FECHA	26/05/2017	ALTURA	2092	GSI	FF/MB 65-70		
LITOLOGIA	Alaskita		FORMACION	JRcgp			
RMR							
PARAMETRO			VALOR		PUNTAJE		
DUREZA			R4		10		
RQD(%)			80%		18		
ESPACIAMIENTO DISCONTINUIDADES(m)			0,30-0,40 m		12		
CONDICION DISCONTINUIDADES							
LONGITUD(m)			3-6m		2		
Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, paredes de roca	<del>Rugosa, separación &lt;1mm, paredes roca ligeramente meteorizada</del>	Ligeramente rugosa, separación <1mm, paredes	Slickenside, falla, rellenos de espesor <5mm, o juntas abiertas 1-5	Relleno blando (gouge) de espesor > 5mm, o juntas abiertas >	18		
CONDICIONES DE AGUA							
CLASE RMR			CALIDAD RMR		RMR'		
Roca Buena			II		75		
RMR (CORREGIDO)							
X							
Q BARTON							
PARAMETRO	PUNTAJE	DESCRIPCION					
RQD	80	Dominio de grandes bloques de roca					
Jn	9	Tres familias de diaclasas					
Jr	3	Diaclasas rugosas e irregulares					
Ja	2	Planos ligeramente alterados, con partículas arenosas					
Jw	1	No hay presencia de agua					
SRF	1	Esfuerzos moderados, condiciones de esfuerzos favorable					
Q	<b>13,33</b>	Roca Buena					
DESCRIPCION							
<b>JV= 12 TB= 0,3 x 0,4 x 0,3 m</b>							
FAMILIAS DISCONTINUIDADES							
Set N°	Longitud (m)	Espaciamento (m)	Ddip (°)	Dip (°)	Jr	Ja	
1 Principal	4-6 m	0,5-1m	118	80	3	2	
1 Secundaria	1-2 m	0,5-0,7 m	200	39	3	2	
2 Secundaria	3-4 m	0,6- 0,8 m	25	71	3	2	

*Recolección de los datos de Mapeo del tramo  $\Delta 1-\Delta 2$ .*

SOCIEDAD MINERA DE SANTANDER S.A.S.		VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO RMR (BIENIAWSKI, 1989) Y Q (Barton, 1993)				DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA	
MAPEO GEOTECNICO							
<b>DELTA</b>	<b>Δ2-Δ3</b>	COORDENADAS Δ2		PUNTO EN TUNEL	X		
NIVEL	X	ESTE	1'125.758	METEORIZACION	2-3		
TUNEL	X	NORTE	1'304,670	AZIMUT DE LA PARED	X		
FECHA	26/05/2017	ALTURA	2092	GSI	FF/MB 65-70		
LITOLOGIA	Alaskitas		FORMACION	JRcgp			
RMR							
PARAMETRO			VALOR		PUNTAJE		
DUREZA			R4		7		
RQD(%)			70		15		
ESPACIAMIENTO DISCONTINUIDADES(m)			0,5-1 m		11		
CONDICION DISCONTINUIDADES							
LONGITUD(m)			3-7 m		2		
Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, paredes de roca	Rugosa, separación <1mm, paredes roca ligeramente meteorizada	Ligeramente rugosa, separación <1mm, paredes	Slickenside, falla, rellenos de espesor <5mm, o juntas abiertas 1-5	Relleno blando (gouge) de espesor > 5mm, o juntas abiertas >	15		
CONDICIONES DE AGUA							
CLASE RMR			CALIDAD RMR		RMR'		
Roca Buena			II		64		
RMR (CORREGIDO)			X				
Q BARTON							
PARAMETRO	PUNTAJE	DESCRIPCION					
RQD	70	Dominio de grandes bloques de roca					
Jn	9	Tres familias de diaclasas					
Jr	2	Diaclasas Onduladas					
Ja	3	Recubrimiento de arcillas arenosas. Fraccion pequeña de arcilla					
Jw	1	No hay presencia de agua					
SRF	1	Esfuerzos moderados, condiciones de esfuerzos favorable					
Q	<b>5,19</b>	Roca Regular					
DESCRIPCION							
JV= 15 TB= 1 x 0,9 x 1,2 m							
FAMILIAS DISCONTINUIDADES							
Set N°	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Ddip (°)	Dip (°)	Jr	Ja	
1 Principal	6-8 m	1 - 1,5 m	158	80	2	2	
1 Secundaria	3-5 m	0,5-0,8 m	34	68	2	2	
2 Secundaria	6-9 m	0,3-0,6 m	170	29	2	4	

*Recolección de los datos de Mapeo del tramo Δ2-Δ3.*



VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO  
RMR (BIENIAWSKI, 1989) Y Q (Barton, 1993)

SOCIEDAD MINERA  
DE SANTANDER S.A.S.

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

MAPEO GEOTECNICO						
<b>DELTA</b>	$\Delta 3-\Delta 4$	COORDENADAS $\Delta 3$		PUNTO EN TUNEL	x	
NIVEL	x	ESTE	1'125.760	METEORIZACION	2	
TUNEL	x	NORTE	1'304.683	AZIMUT DE LA PARED	x	
FECHA	26/05/2017	ALTURA	2092	GSI	FB/MB 70-75	
LITOLOGIA	Alaskita		FORMACION	JRcgp		
RMR						
PARAMETRO			VALOR		PUNTAJE	
DUREZA			R5		11	
RQD(%)			90%		19	
ESPACIAMIENTO DISCONTINUIDADES(m)			0,4-0,9 m		13	
CONDICION DISCONTINUIDADES						
LONGITUD(m)			4-10 m		2	
Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, paredes de roca	<del>Rugosa, separación &lt;1mm, paredes roca ligeramente meteorizada</del>	Ligeramente rugosa, separación <1mm, paredes	Slickenside, falla, rellenos de espesor <5mm, o juntas abiertas 1-5	Relleno blando (gouge) de espesor > 5mm, o juntas abiertas >	20	
CONDICIONES DE AGUA						
CLASE RMR			CALIDAD RMR		RMR'	
Muy Buena			I		80	
PUNTAJE						
Muy Buena			I		80	
Q BARTON						
PARAMETRO	PUNTAJE	DESCRIPCION				
RQD	90	Gran dominio de grandes bloques de roca				
Jn	9	Tres familias de diaclasas				
Jr	3	Diaclasas rugosas e irregulares				
Ja	1	Superficies ligeramente manchadas				
Jw	1	No hay presencia de agua				
SRF	1	Esfuerzos moderados, condiciones de esfuerzos favorable				
Q	<b>30,00</b>	Roca Buena				
DESCRIPCION						
JV= 14 TB= 1,10 x 0,6 x 0,7 m						
FAMILIAS DISCONTINUIDADES						
Set N°	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Ddip (°)	Dip (°)	Jr	Ja
1 Principal	3-5 m	0,4-0,7 m	42	63	3	1
1 Secundaria	4-7 m	0,4-0,7 m	209	46	3	1
2 Secundaria	2-3 m	0,3-0,6 m	156	48	3	2

Recolección de los datos de Mapeo del tramo  $\Delta 3-\Delta 4$ .




VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO  
RMR (BIENIAWSKI, 1989) Y Q (Barton, 1993)

SOCIEDAD MINERA  
DE SANTANDER S.A.S.

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

MAPEO GEOTECNICO						
<b>DELTA</b>	$\Delta 4-\Delta 5$	COORDENADAS $\Delta 4$		PUNTO EN TUNEL	x	
NIVEL	x	ESTE	1'125.795	METEORIZACION	2	
TUNEL	x	NORTE	1'304,689	AZIMUT DE LA PARED	x	
FECHA	26/05/2017	ALTURA	2094	GSI	FB/MB 70-75	
LITOLOGIA	Alaskita		FORMACION	JRcgp		
RMR						
PARAMETRO			VALOR		PUNTAJE	
DUREZA			R5		12	
RQD(%)			75%		15	
ESPACIAMIENTO DISCONTINUIDADES(m)			0,30-1 m		13	
CONDICION DISCONTINUIDADES						
LONGITUD(m)			7-10 m		2	
Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, paredes de roca	<del>Rugosa, separación &lt;1mm, paredes roca ligeramente meteorizada</del>	Ligeramente rugosa, separación <1mm, paredes	Slickenside, falla, rellenos de espesor <5mm, o juntas abiertas 1-5	Relleno blando (gouge) de espesor > 5mm, o juntas abiertas >	18	
CONDICIONES DE AGUA						
CLASE RMR			CALIDAD RMR		RMR'	
Roca Buena			II		75	
RMR (CORREGIDO)						
<b>x</b>						
Q BARTON						
PARAMETRO	PUNTAJE	DESCRIPCION				
RQD	75	Dominio de grandes bloques de roca				
Jn	9	Tres familias de diaclasas				
Jr	3	Diaclasas rugosas e irregulares				
Ja	3	Recubrimiento de arcillas arenosas. Fraccion pequeña de arcilla				
Jw	1	No hay presencia de agua				
SRF	1	Esfuerzos moderados, condiciones de esfuerzos favorable				
Q	<b>8,33</b>	Roca Buena				
DESCRIPCION						
JV= 12 TB= 0,7 x 0,7 x 0,6 m						
FAMILIAS DISCONTINUIDADES						
Set N°	Longitud (m)	Espaciamento (m)	Ddip (°)	Dip (°)	Jr	Ja
1 Principal	7-10 m	0,8-1,20 m	146	88	3	3
1 Secundaria	5-6 m	0,4-0,9 m	34	49	3	3
2 Secundaria	1-3 m	0,2-0,5 m	301	54	3	3

*Recolección de los datos de Mapeo del tramo  $\Delta 4-\Delta 5$ .*

		VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO RMR (BIENIAWSKI, 1989) Y Q (Barton, 1993)				DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA	
MAPEO GEOTECNICO							
<b>DELTA</b>	<b>Δ5-Δ6</b>	COORDENADAS Δ5		PUNTO EN TUNEL	x		
NIVEL	x	ESTE	1'125.795	METEORIZACION	6		
TUNEL	x	NORTE	1'304,689	AZIMUT DE LA PARED	x		
FECHA	26/05/2017	ALTURA	2098	GSI	x		
LITOLOGIA	Alaskitas		FORMACION	JRcgp			
RMR							
PARAMETRO		VALOR			PUNTAJE		
DUREZA		x			x		
RQD(%)		x			x		
ESPACIAMIENTO DISCONTINUIDADES(m)		x			x		
CONDICION DISCONTINUIDADES		x			x		
LONGITUD(m)		x			x		
Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, paredes de roca	Rugosa, separación <1mm, paredes roca ligeramente meteorizada	Ligeramente rugosa, separación <1mm, paredes	Slickenside, falla, rellenos de espesor <5mm, o juntas abiertas 1-5	Relleno blando (gouge) de espesor > 5mm, o juntas abiertas >	x		
CONDICIONES DE AGUA							
CLASE RMR		CALIDAD RMR		RMR'		RMR (CORREGIDO)	
x		x		X		X	
Q BARTON							
PARAMETRO	PUNTAJE	DESCRIPCION					
RQD	x	x					
Jn	x	x					
Jr	x	x					
Ja	x	x					
Jw	x	x					
SRF	x	x					
Q	X	x					
DESCRIPCION							
Tramo cubierto por capa vegetal tipo arbusto, suelo residual, con presencia de pequeños derrubios.							
FAMILIAS DISCONTINUIDADES							
Set N°	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Ddip (°)	Dip (°)	Jr	Ja	
x	x	x	x	x	x	x	
x	x	x	x	x	x	x	
x	x	x	x	x	x	x	

*Recolección de los datos de Mapeo del tramo Δ5-Δ6.*

SOCIEDAD MINERA DE SANTANDER S.A.S.		VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO RMR (BIENIAWSKI, 1989) Y Q (Barton, 1993)				DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA	
MAPEO GEOTECNICO							
<b>DELTA</b>	$\Delta 6-\Delta 7$	COORDENADAS $\Delta 6$		PUNTO EN TUNEL	x		
NIVEL	X	ESTE	1'125.066	METEORIZACION	3-4		
TUNEL	x	NORTE	1'304,760	AZIMUT DE LA PARED	x		
FECHA	27/05/2017	ALTURA	2116	GSI	FF/R 45-50		
LITOLOGIA	Alaskita		FORMACION	JRcgp			
RMR							
PARAMETRO			VALOR	PUNTAJE			
DUREZA			R3	5			
RQD(%)			60%	12			
ESPACIAMIENTO DISCONTINUIDADES(m)			0,2-0,5 m	9			
CONDICION DISCONTINUIDADES							
LONGITUD(m)			1-2 m		4		
Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, paredes de roca	Rugosa, separación <1mm, paredes roca ligeramente meteorizada	Ligeramente rugosa, separación <1mm, paredes	Slickenside, falla, rellenos de espesor <5mm, o juntas abiertas 1-5	Relleno blando (gouge) de espesor > 5mm, o juntas abiertas >	14		
CONDICIONES DE AGUA							
CLASE RMR			CALIDAD RMR	RMR'	RMR (CORREGIDO)		
Roca Regular			III	58	X		
Q BARTON							
PARAMETRO	PUNTAJE	DESCRIPCION					
RQD	60	Moderada cantidad de grandes bloques de roca					
Jn	12	Tres familias de diaclasas y algunas diaclasas aleatorias					
Jr	3	Diaclasas rugosas e irregulares					
Ja	3	Recubrimiento de arcillas arenosas. Fracción pequeña de arcilla					
Jw	1	No hay presencia de agua					
SRF	2,5	Bajos esfuerzos, fracturas abiertas					
Q	<b>2,00</b>	Roca Pobre					
DESCRIPCION							
<b>JV= 10 TB= 0,5 x 0,5 x 0,5 m</b>							
FAMILIAS DISCONTINUIDADES							
Set N°	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Ddip (°)	Dip (°)	Jr	Ja	
1 Principal	1-2 m	0,3-0,5 m	4	64	3	3	
1 Secundaria	0,5-1 m	0,2-0,3 m	93	66	3	4	
2 Secundaria	1,5-2 m	0,3-0,6 m	130	84	3	3	
Aleatoria	0,5-0,8 m	0,2-0,3 m	132	54	3	3	

*Recolección de los datos de Mapeo del tramo  $\Delta 6-\Delta 7$ .*

		<b>VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO</b> RMR (BIENIAWSKI, 1989) Y Q (Barton, 1993)				<b>DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA</b>	
<b>MAPEO GEOTECNICO</b>							
<b>DELTA</b>	<b>Δ7-Δ8</b>	<b>COORDENADAS Δ7</b>			<b>PUNTO EN TUNEL</b>	X	
NIVEL	X	ESTE	1'125.900		METEORIZACION	6	
TUNEL	X	NORTE	1'304,802		AZIMUT DE LA PARED	X	
FECHA	27/05/2017	ALTURA	2125		GSI	X	
LITOLOGIA	Alaskita		FORMACION	JRcgp			
<b>RMR</b>							
PARAMETRO			VALOR		PUNTAJE		
DUREZA			X		X		
RQD(%)			X		X		
ESPACIAMIENTO DISCONTINUIDADES(m)			X		X		
CONDICION DISCONTINUIDADES							
LONGITUD(m)			X		X		
Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, paredes de roca	Rugosa, separación <1mm, paredes roca ligeramente meteorizada	Ligeramente rugosa, separación <1mm, paredes	Slickenside, falla, rellenos de espesor <5mm, o juntas abiertas 1-5	Relleno blando (gouge) de espesor > 5mm, o juntas abiertas >	X		
CONDICIONES DE AGUA			X		X		
CLASE RMR		CALIDAD RMR		RMR'	RMR (CORREGIDO)		
X		X		X	X		
<b>Q BARTON</b>							
PARAMETRO	PUNTAJE	DESCRIPCION					
RQD	X	X					
Jn	X	X					
Jr	X	X					
Ja	X	X					
Jw	X	X					
SRF	X	X					
Q	X	X					
<b>DESCRIPCION</b>							
<b>Tramo cubierto por capa vegetal tipo arbusto, suelo residual, con presencia de pequeños derrubios.</b>							
<b>FAMILIAS DISCONTINUIDADES</b>							
Set N°	Longitud (m)	Espaciamento (m)	Ddip (°)	Dip (°)	Jr	Ja	
X	X	X	X	X	X	X	
X	X	X	X	X	X	X	
X	X	X	X	X	X	X	

*Recolección de los datos de Mapeo del tramo Δ7-Δ8.*

SOCIIDAD MINERA DE SANTANDER S.A.S.		VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO RMR (BIENIAWSKI, 1989) Y Q (Barton, 1993)				DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA	
MAPEO GEOTECNICO							
<b>DELTA</b>	$\Delta 8-\Delta 9$	COORDENADAS $\Delta 8$		PUNTO EN TUNEL	x		
NIVEL	x	ESTE	1'125.000	METEORIZACION	3		
TUNEL	x	NORTE	1'304,838	AZIMUT DE LA PARED	x		
FECHA	27/05/2017	ALTURA	2128	GSI	FB/B 60-65		
LITOLOGIA	Alaskita		FORMACION	JRcgp			
RMR							
PARAMETRO		VALOR		PUNTAJE			
DUREZA		R4		9			
RQD(%)		55%		10			
ESPACIAMIENTO DISCONTINUIDADES(m)		0,1-0,4 m		7			
CONDICION DISCONTINUIDADES							
LONGITUD(m)		2-3 m		4			
Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, paredes de roca	Rugosa, separación <1mm, paredes roca ligeramente meteorizada	<del>Ligeramente rugosa, separación &lt;1mm, paredes</del>	Slickenside, falla, rellenos de espesor <5mm, o juntas abiertas 1-5	Relleno blando (gouge) de espesor > 5mm, o juntas abiertas >	12		
CONDICIONES DE AGUA							
CLASE RMR		CALIDAD RMR		RMR'		RMR (CORREGIDO)	
Roca Regular		III		57		x	
Q BARTON							
PARAMETRO	PUNTAJE	DESCRIPCION					
RQD	55	Moderada cantidad de grandes bloques de roca					
Jn	12	Tres familias de diaclasas y algunas diaclasas aleatorias					
Jr	3	Diaclasas rugosas e irregulares					
Ja	3	Recubrimiento de arcillas arenosas. Fraccion pequeña de arcilla					
Jw	1	No hay presencia de agua					
SRF	2,5	Bajos esfuerzos, fracturas abiertas					
Q	<b>1,83</b>	Roca Pobre					
DESCRIPCION							
<b>JV= 14 TB= 0,3 x 0,7 x 0,4 m</b>							
FAMILIAS DISCONTINUIDADES							
Set N°	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Ddip (°)	Dip (°)	Jr	Ja	
1 Principal	2-3 m	0,3-0,4 m	171	60	3	3	
1 Secundaria	1-2 m	0,1-0,2 m	109	71	3	4	
2 Secundaria	0,5-1 m	0,3-0,4 m	272	50	3	4	
Aleatoria	0,4-0,5 m	0,1-0,2 m	193	67	3	3	

Recolección de los datos de Mapeo del tramo  $\Delta 8-\Delta 9$ .



VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO  
RMR (BIENIAWSKI, 1989) Y Q (Barton, 1993)

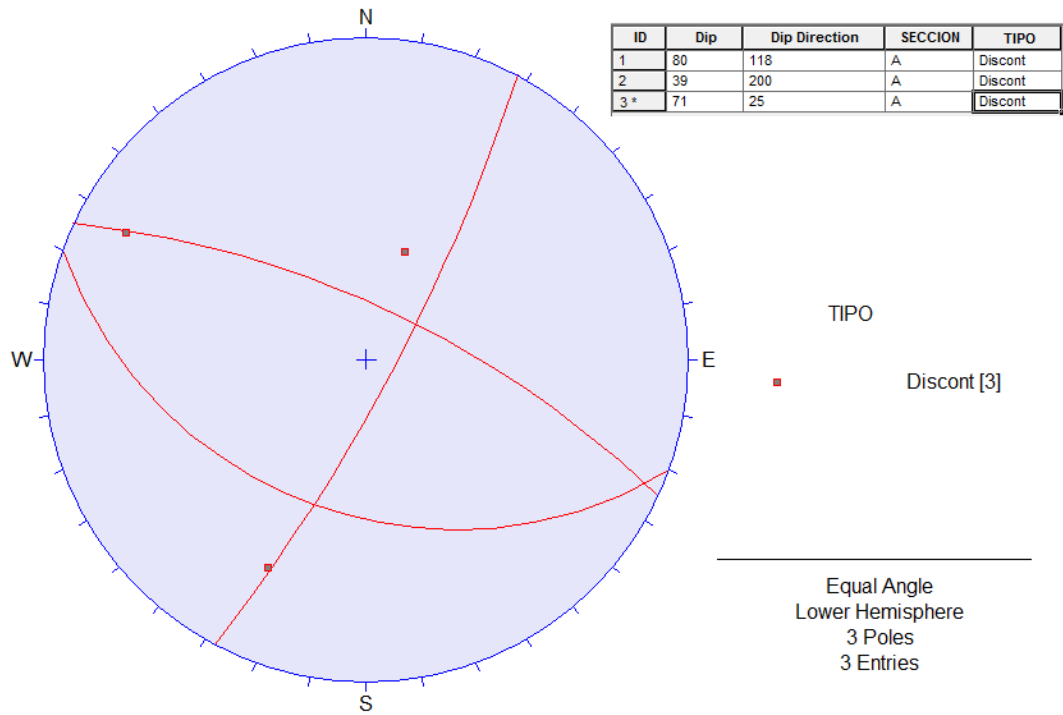
SOCIEDAD MINERA  
DE SANTANDER S.A.S.

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

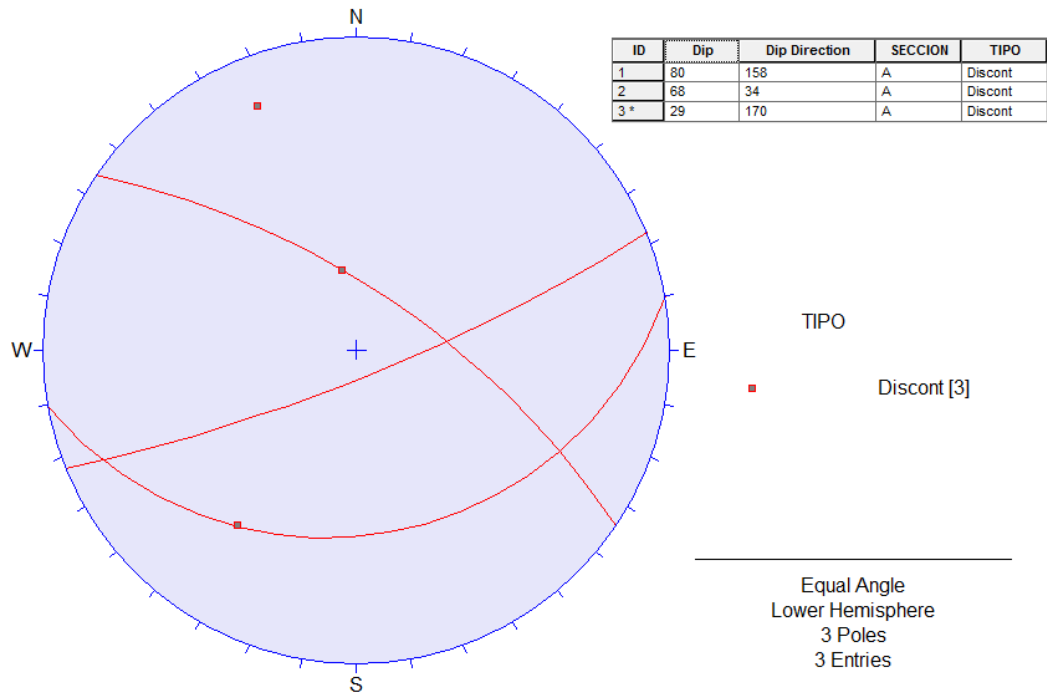
MAPEO GEOTECNICO						
<b>DELTA</b>	$\Delta 9-\Delta 10$	COORDENADAS $\Delta 9$		PUNTO EN TUNEL	X	
NIVEL	X	ESTE	1'125.006	METEORIZACION	2-3	
TUNEL	X	NORTE	1'304,847	AZIMUT DE LA PARED	X	
FECHA	27/05/2017	ALTURA	2130	GSI	FF/B 50-55	
LITOLOGIA	Alaskita		FORMACION	JRcgp		
RMR						
PARAMETRO			VALOR		PUNTAJE	
DUREZA			R5		12	
RQD(%)			70%		16	
ESPACIAMIENTO DISCONTINUIDADES(m)			0,5-2 m		13	
CONDICION DISCONTINUIDADES						
LONGITUD(m)			7-9 m		2	
Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, paredes de roca	Rugosa, separación <1mm, paredes roca ligeramente meteorizada	Ligeramente rugosa, separación <1mm, paredes	Slickenside, falla, rellenos de espesor <5mm, o juntas abiertas 1-5	Relleno blando (gouge) de espesor > 5mm, o juntas abiertas >	16	
CONDICIONES DE AGUA						
CLASE RMR			CALIDAD RMR		RMR'	
Roca Buena			II		74	
					RMR (CORREGIDO)	
					X	
Q BARTON						
PARAMETRO	PUNTAJE	DESCRIPCION				
RQD	70	Moderada cantidad de grandes bloques de roca				
Jn	9	Tres familias de diaclasas y algunas diaclasas aleatorias				
Jr	3	Diaclasas rugosas e irregulares				
Ja	2	Recubrimiento de arcillas arenosas. Fraccion pequeña de arcilla				
Jw	1	No hay presencia de agua				
SRF	1	Bajos esfuerzos, fracturas abiertas				
Q	<b>11,67</b>	Roca Buena				
DESCRIPCION						
JV= 13 TB= 0,7 x 1 x 2 m			<b><math>\Delta 10</math>:</b> Este : 1'125.026 Norte:1'304.866 Altura: 2130			
FAMILIAS DISCONTINUIDADES						
Set N°	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Ddip (°)	Dip (°)	Jr	Ja
1 Principal	7-9 m	0,5-2 m	154	67	3	2
1 Secundaria	2-4 m	0,4-0,7 m	222	78	3	3
2 Secundaria	1-2 m	0,1-0,3 m	265	62	3	3

Recolección de los datos de Mapeo del tramo  $\Delta 9-\Delta 10$ .

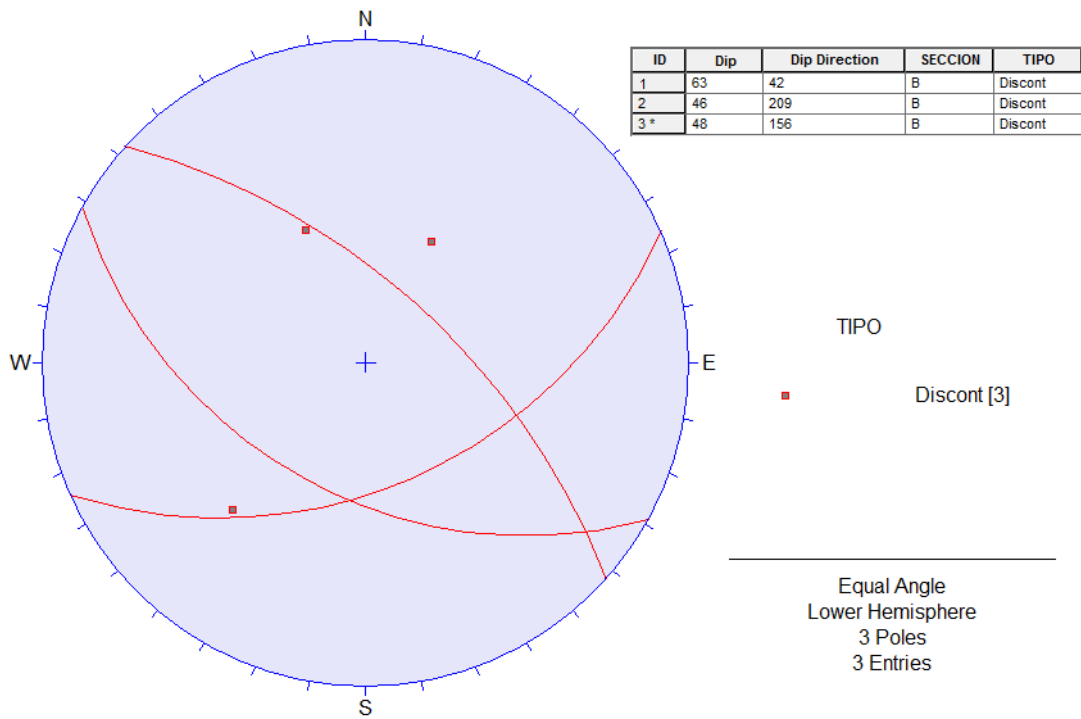
## ANEXO B: ORIENTACIONES DE LAS FAMILIAS DE LAS DISCONTINUIDADES



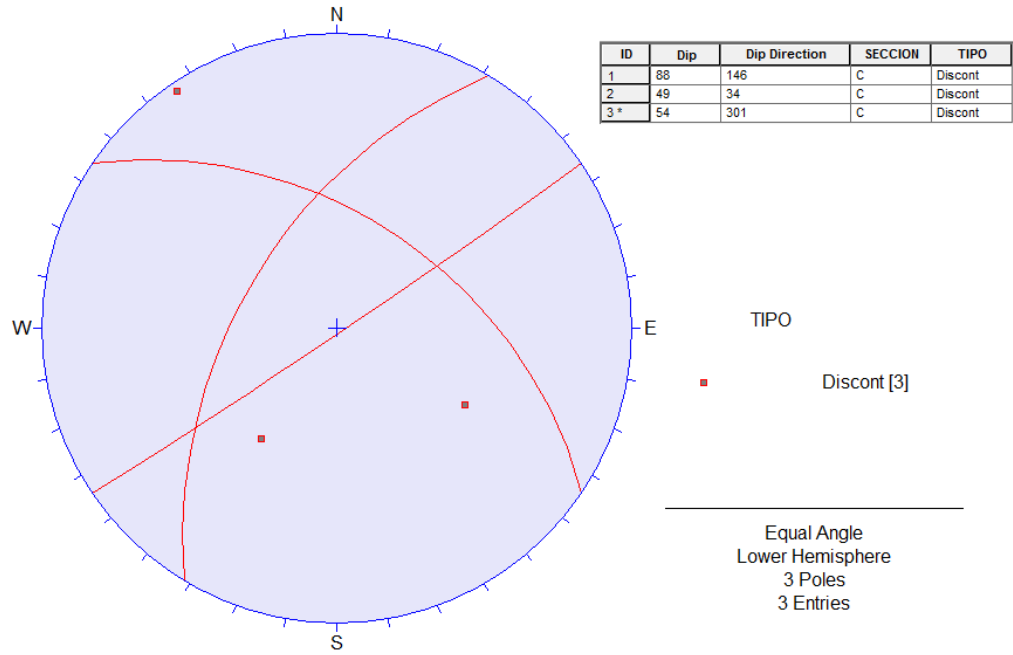
*Proyección Estereográfica del tramo Δ1-Δ2. (Software Dips)*



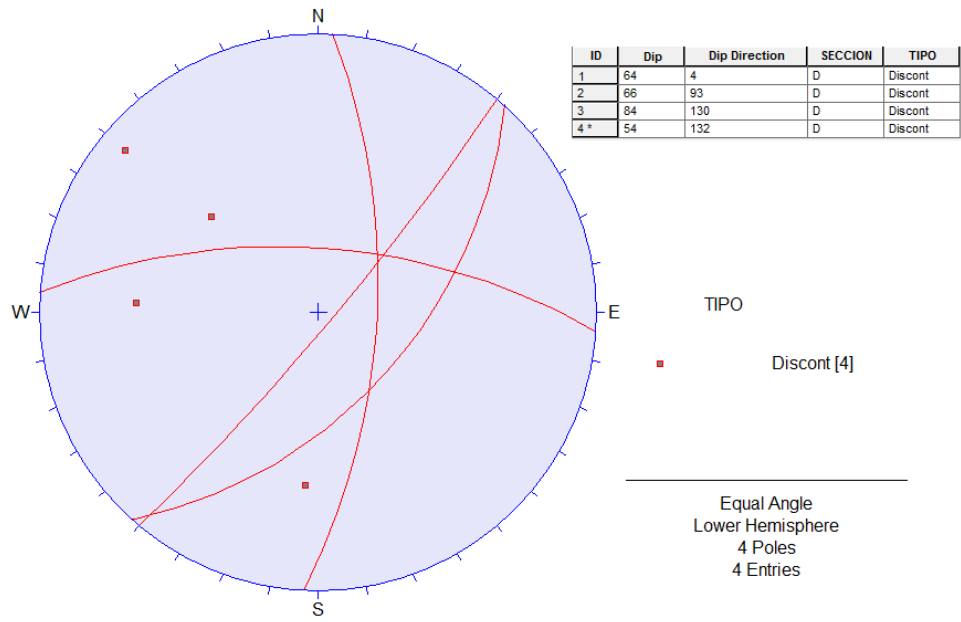
*Proyección Estereográfica del tramo Δ2-Δ3. (Software Dips)*



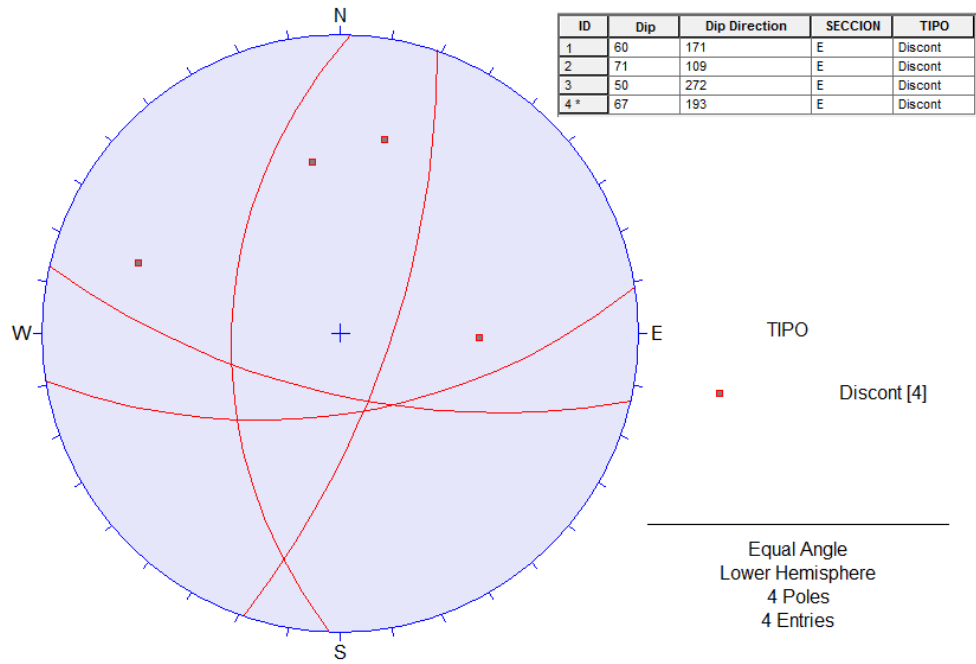
*Proyección Estereográfica del tramo Δ3-Δ4. (Software Dips)*



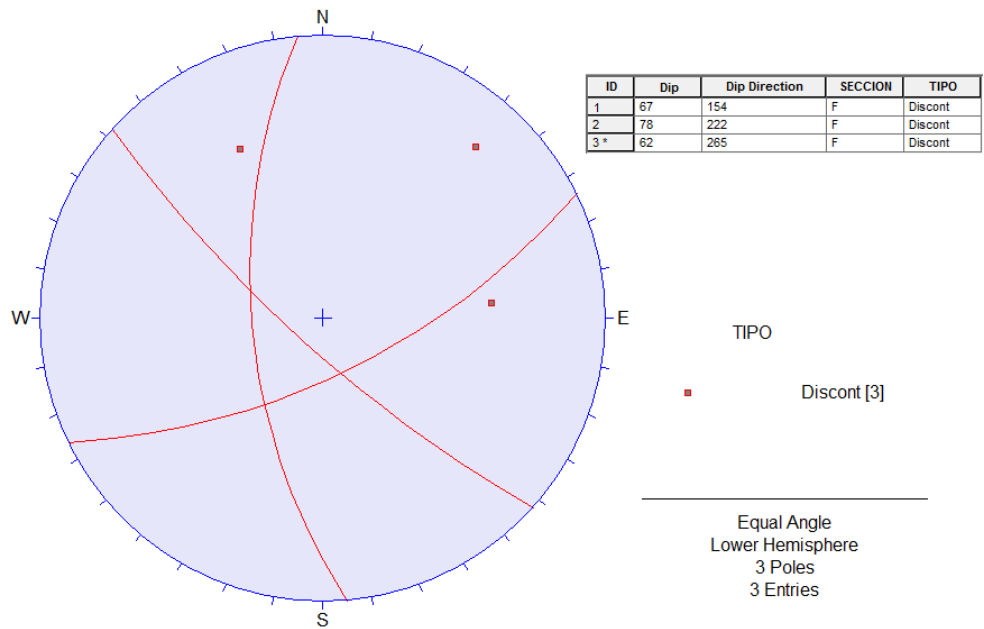
*Proyección Estereográfica del tramo Δ4-Δ5. (Software Dips)*



*Proyección Estereográfica del tramo Δ6-Δ7. (Software Dips)*



*Proyección Estereográfica del tramo Δ8-Δ9. (Software Dips)*



*Proyección Estereográfica del tramo Δ9-Δ10. (Software Dips)*

## ANEXO C: TABLA DE EXCEL DE ENSAYOS DE CARGA PUNTUAL PARA CÁLCULO DE UCS

**Point Load Tester MODEL: GCTS PLT-100**

Gauge #	Value kN	Gauge Calibrations	Value lb	Correlation UCS/Is50
1	1		224,8	15,4

Gauge calibrations set to convert kN to lb

**General Notes:**

- De Equivalent Core Diameter
- Is Uncorrected Point Load Index
- Fs Size Correction Factor
- Is50 Corrected Point Load Index
- UCS Unconfined Compressive Strength

**Failure Codes:**

- 1 = Diametral valid failure
- 2 = Axial valid failure
- 3 = Block valid failure
- 4 = Diametral invalid chipped failure
- 5 = Axial invalid shear failure
- 6 = Diametral/Axial invalid failure along healed joint

Formula - DO NOT CHANGE  
 Row requires input from each test or borehole  
 Project or gauge specific values - DO NOT CHANGE

PLT-SAMPLE Number	DELTA Number	Weathering ISRM	SAMPLE Diam (mm)	Pin (1 - 5)	Indentation (mm)	Length (l) (mm)	Gauge Tare (kN)	Gauge Reading (kN)	Failure Value (kN)	Calibrated Load (lbs)	Failure Code	De**2 (mm^2)	Is psi	Fs	Is50 (MPa)	UCS (MPa)	ISRM R Index
1	Δ1-Δ2	II	50	3	4	50	0,00	7,47	7,5	1679	2	3183	340	1,06	2,48	38,1	3
2	Δ2-Δ3	II	50	3	5	50	0,00	4,35	4,4	978	2	3183	198	1,06	1,44	22,2	2
3	Δ3-Δ4	II	50	3	6	50	0,00	11,53	11,5	2592	2	3183	525	1,06	3,83	58,8	4
4	Δ4-Δ5	I	50	3	2	50	0,00	5,74	5,7	1290	6	3183	262	1,06	1,90	29,3	3
5	Δ6-Δ7	II	50	3	4	50	0,00	23,16	23,2	5206	2	3183	1055	1,06	7,68	118,1	5
6	Δ8-Δ9	II	50	3	6	50	0,00	3,34	3,3	751	2	3183	152	1,06	1,11	17,0	2
7	Δ9-Δ10	I	50	3	6	50	0,00	20,79	20,8	4674	2	3183	947	1,06	6,90	106,0	5

*Tabla Excel para los cálculos del Índice de Resistencia de la Roca Intacta UCS.*

## ANEXO D: MODELAMIENTO CON EL SOFTWARE SLIDE

### PARTE 1: DATOS DE ENTRADA PARA EI ANÁLISIS SLIDE

## *Slide Analysis Information*

### Project Settings

Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program  
Failure Direction: Left to Right  
Units of Measurement: SI Units  
Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>  
Groundwater Method: Ru Coefficient  
Data Output: Standard  
Calculate Excess Pore Pressure: Off  
Allow Ru with Water Surfaces or Grids: Off  
Random Numbers: Pseudo-random Seed  
Random Number Seed: 10116  
Random Number  
Generation Method: Park and Miller v.3

### Surface Options

Surface Type: Circular  
Radius increment: 10  
Minimum Elevation: Not Defined  
Composite Surfaces: Disabled  
Reverse Curvature: Create Tension Crack

### Loading

Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.0 → Condición Normal  
0.13 → Condición Sísmica

### Analysis Methods

Analysis Methods used:  
Spencer

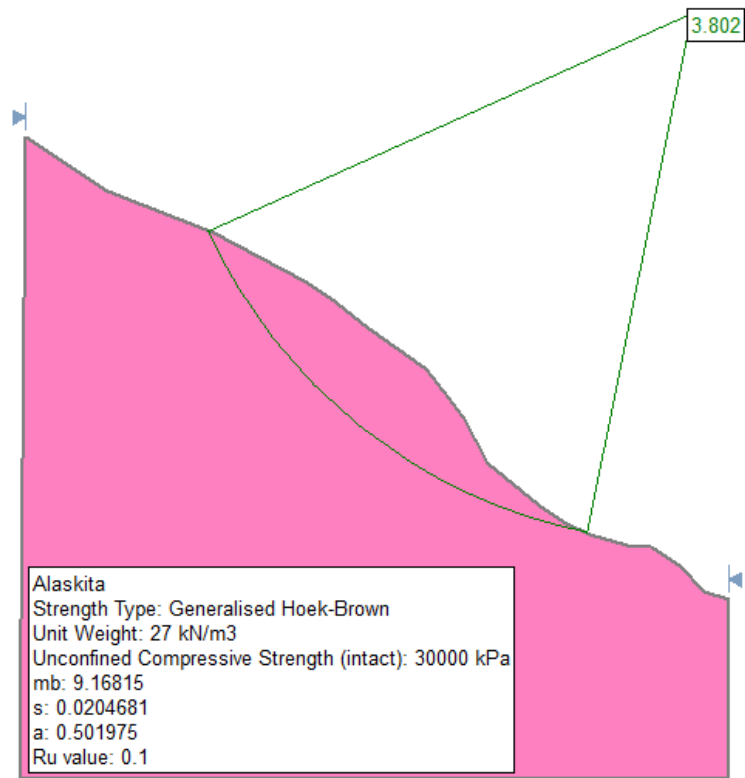
Number of slices: 25  
Tolerance: 0.005  
Maximum number of iterations: 50

### Material Properties

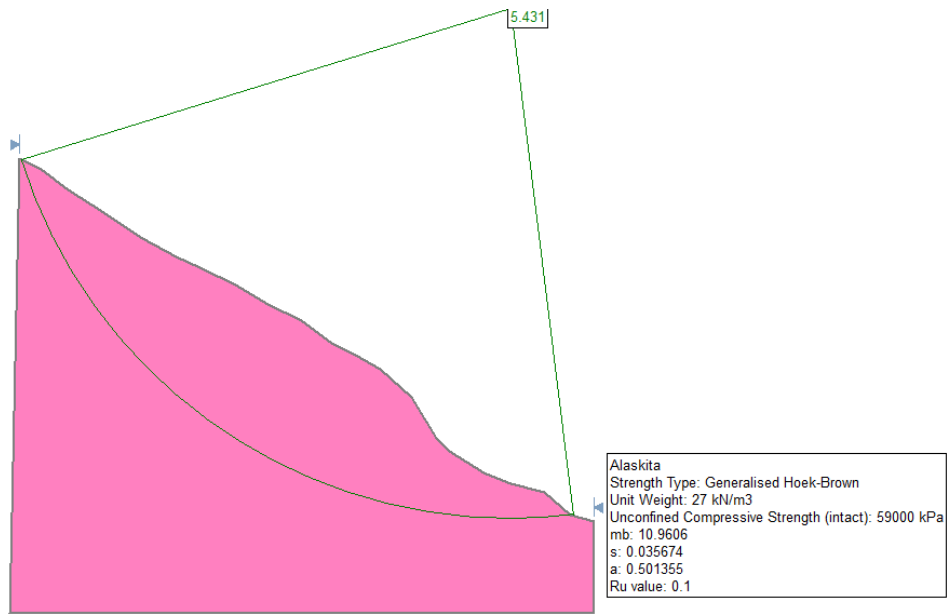
Material: Alaskita  
Strength Type: Generalised Hoek-Brown  
Unit Weight: 27 kN/m<sup>3</sup>  
Unconfined Compressive Strength (intact): <sup>Ver</sup> Tabla 15  
mb: 10.9606  
s: 0.035674  
a: 0.501355  
Ru value: 0.1 → Condición Normal y Sísmica  
0.25 → Condición Saturada

## ANEXO D

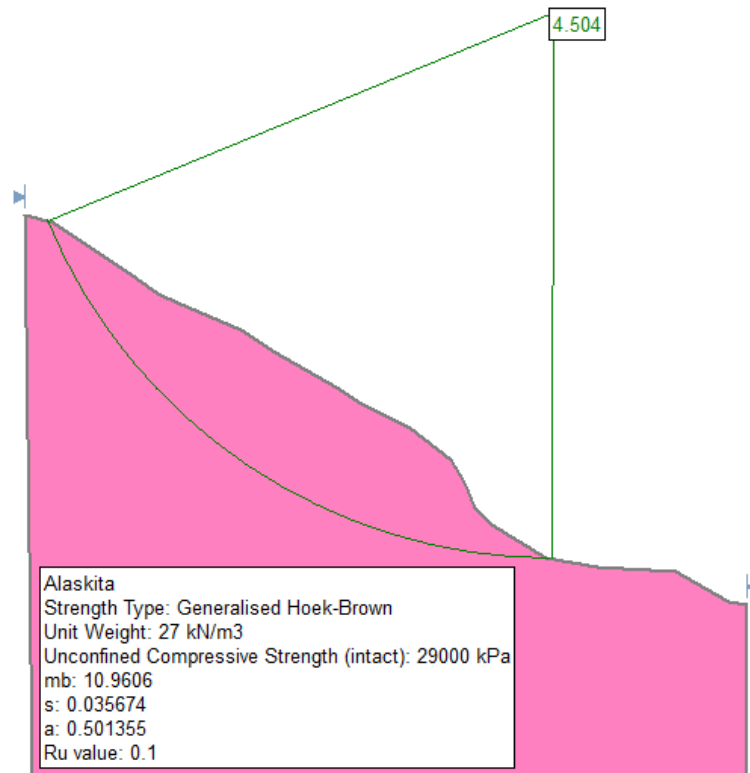
### PARTE 2: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD CON SLIDE EN CONDICIONES NORMALES



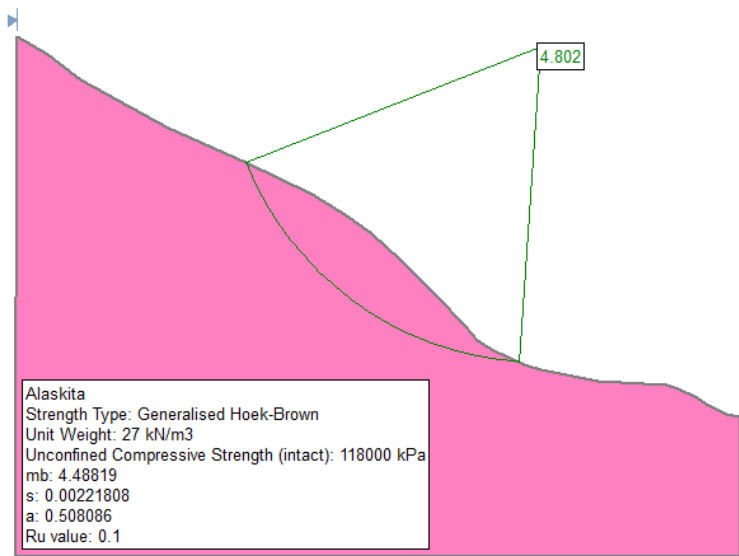
*Análisis de estabilidad de la Sección A en condiciones normales.*



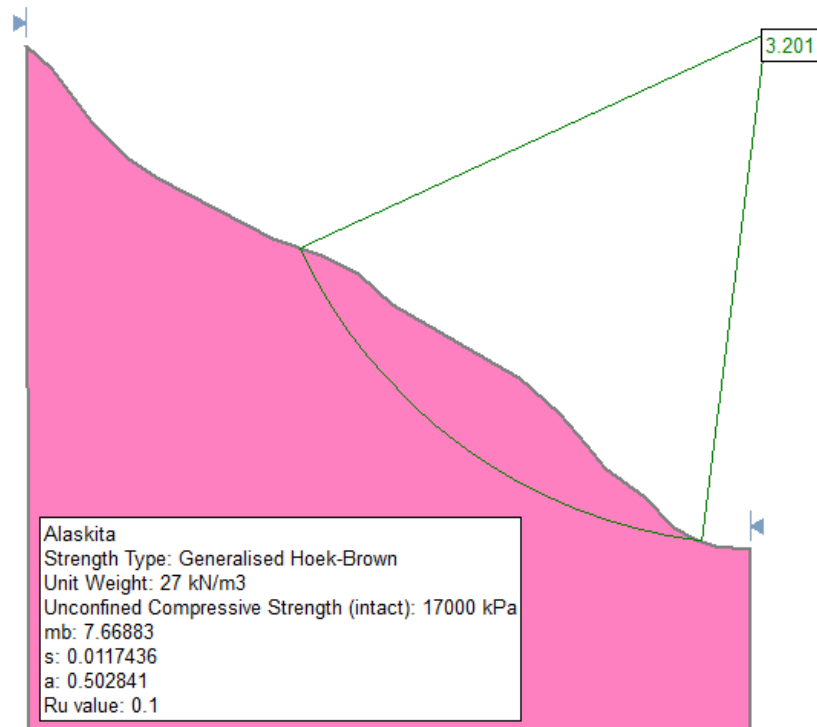
*Análisis de estabilidad de la Sección B en condiciones normales.*



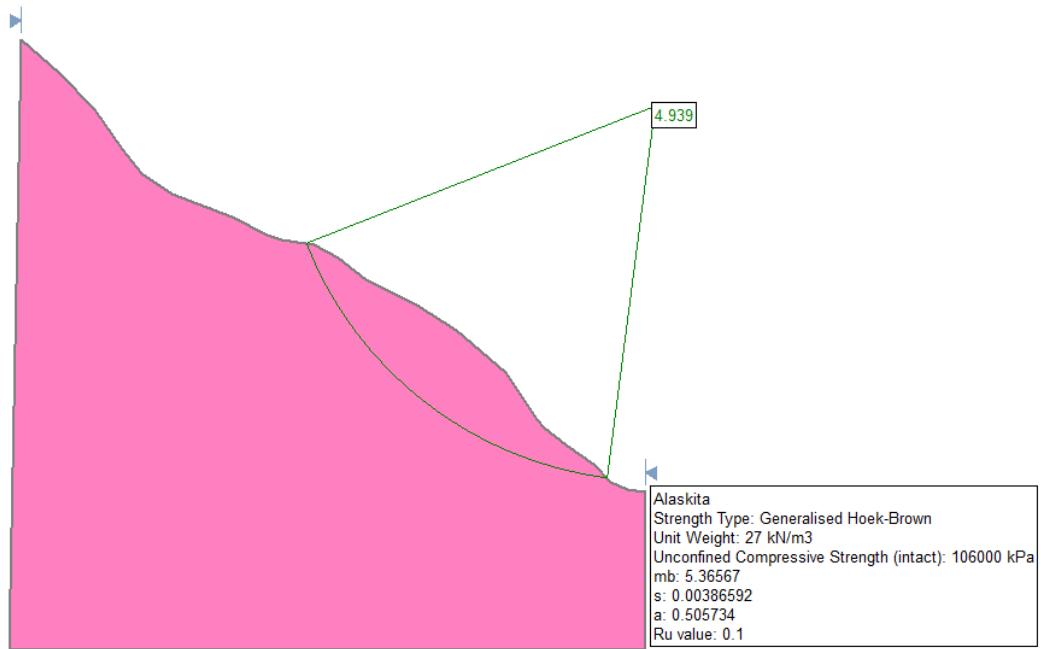
*Análisis de estabilidad de la Sección C en condiciones normales.*



*Análisis de estabilidad de la Sección D en condiciones normales.*



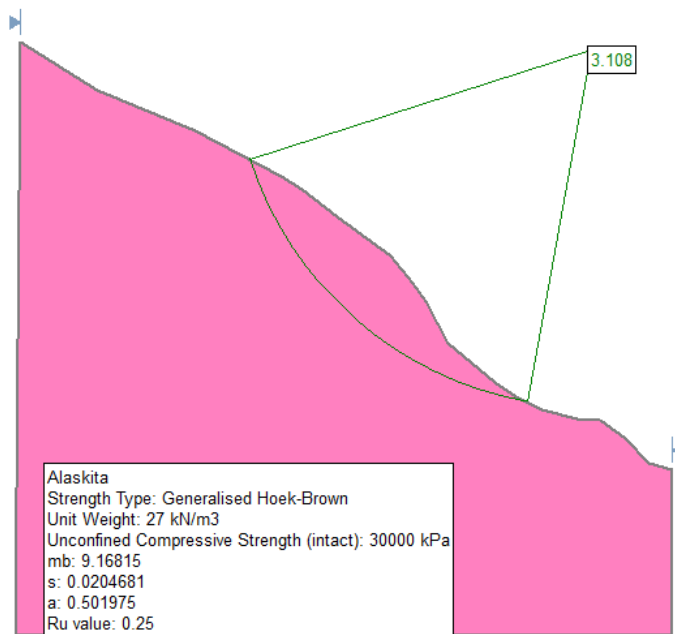
*Análisis de estabilidad de la Sección E en condiciones normales.*



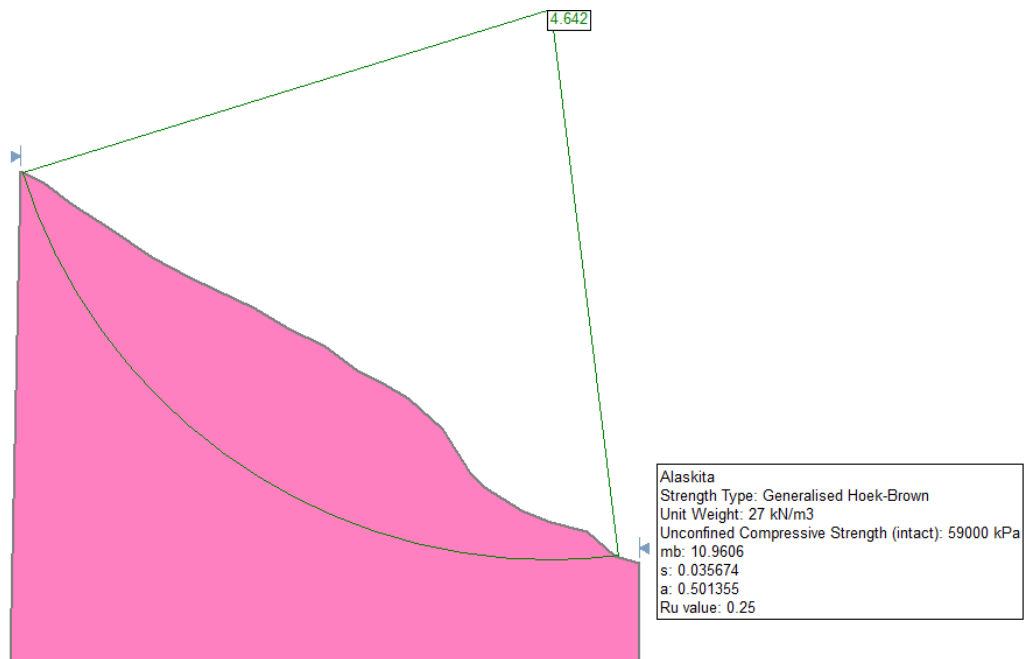
*Análisis de estabilidad de la Sección F en condiciones normales.*

## ANEXO D

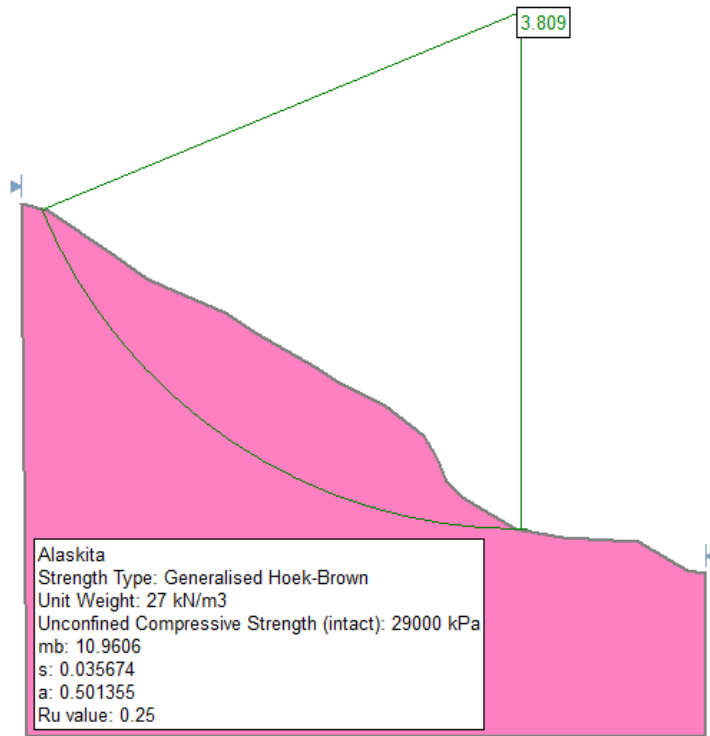
### PARTE 3: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD CON SLIDE EN CONDICIONES SATURADAS



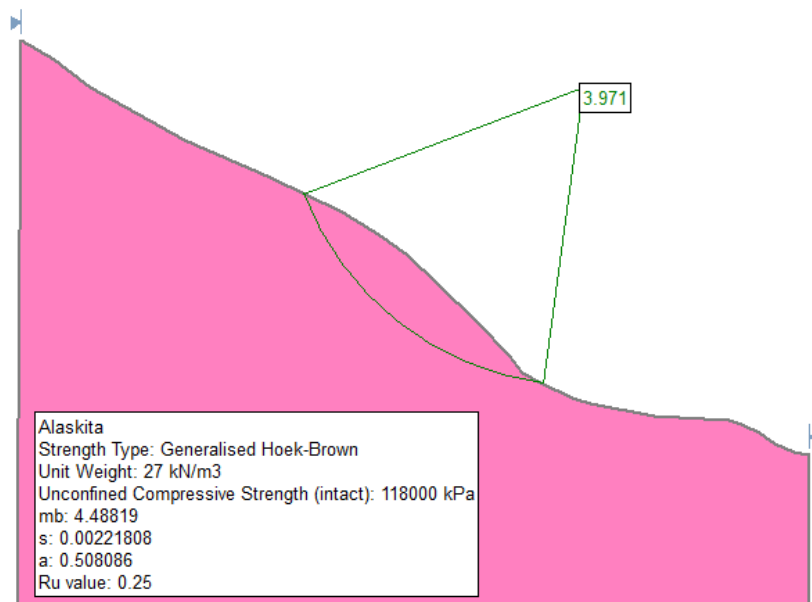
*Análisis de estabilidad de la Sección A en condiciones saturadas.*



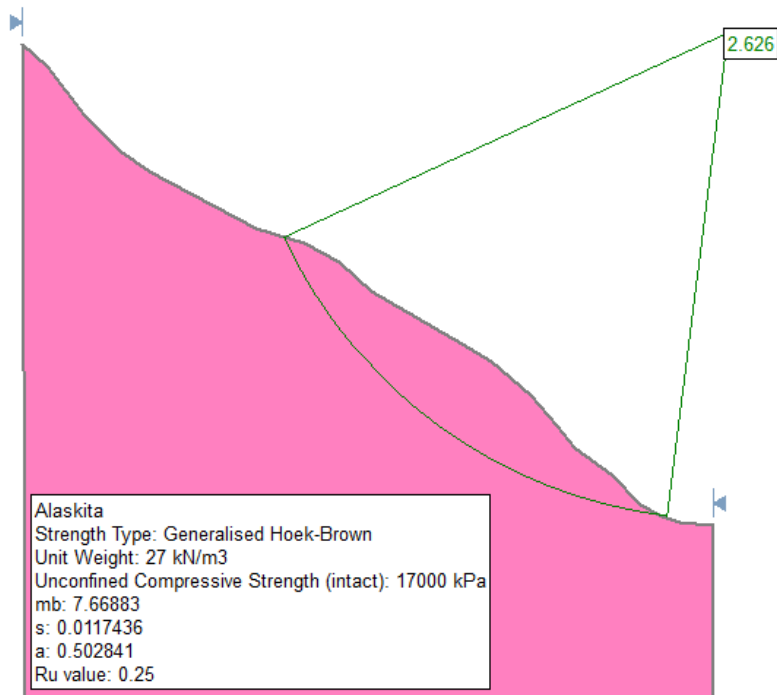
*Análisis de estabilidad de la Sección B en condiciones saturadas.*



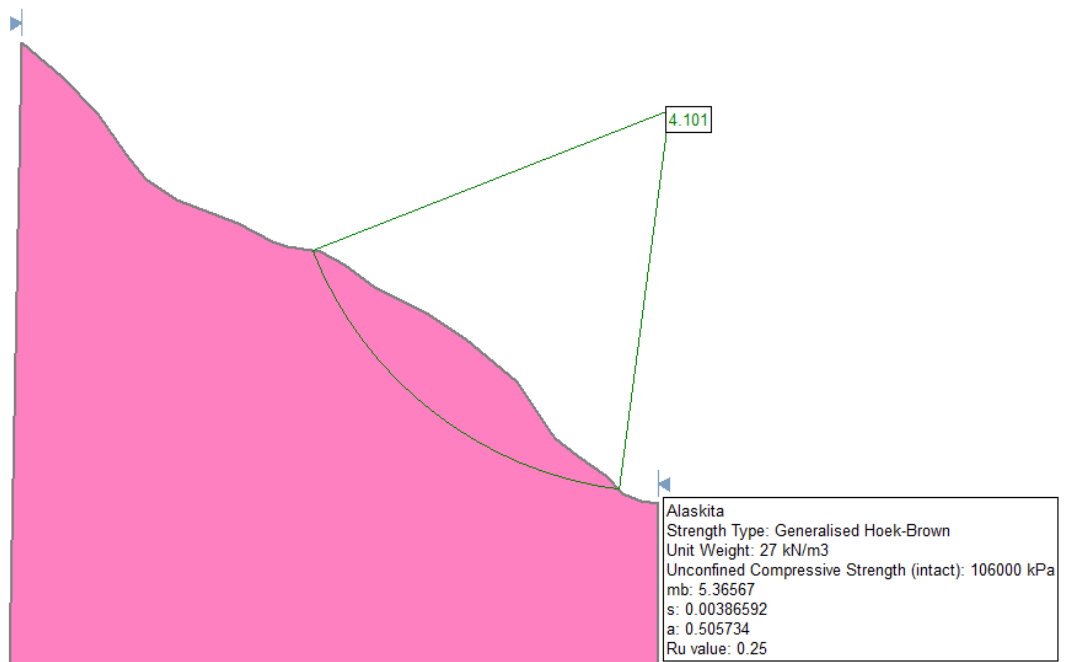
*Análisis de estabilidad de la Sección C en condiciones saturadas.*



*Análisis de estabilidad de la Sección D en condiciones saturadas.*



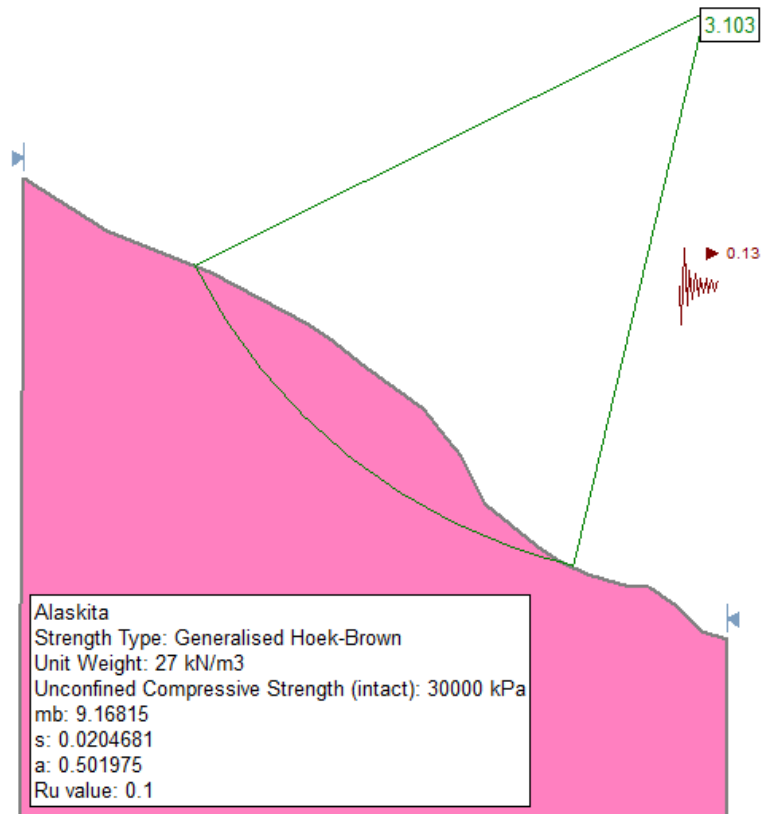
*Análisis de estabilidad de la Sección E en condiciones saturadas.*



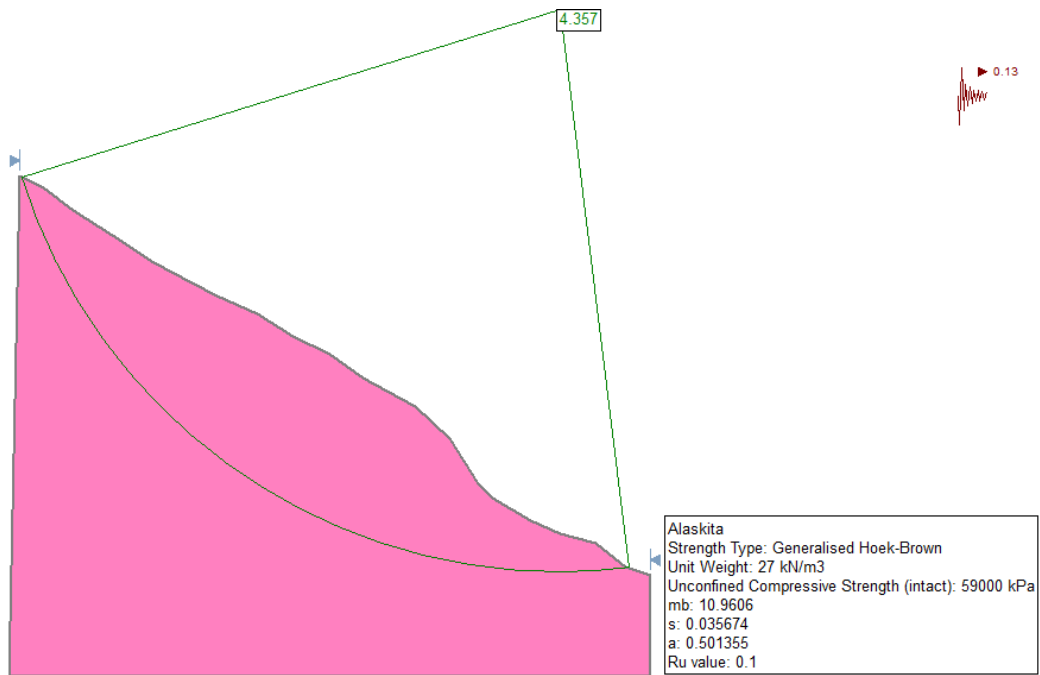
*Análisis de estabilidad de la Sección F en condiciones saturadas.*

## ANEXO D

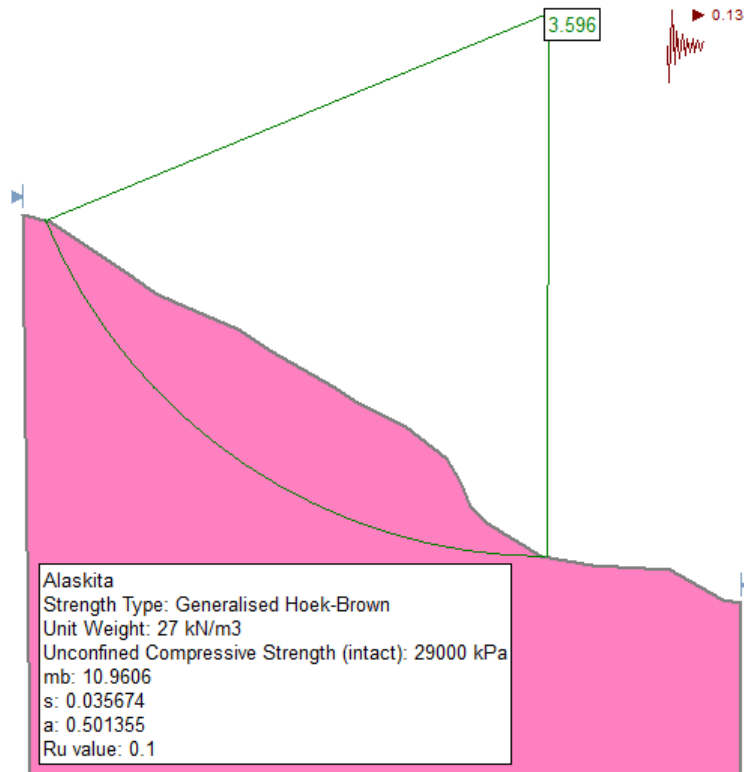
### PARTE 4: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD CON SLIDE EN CONDICIONES SATURADAS



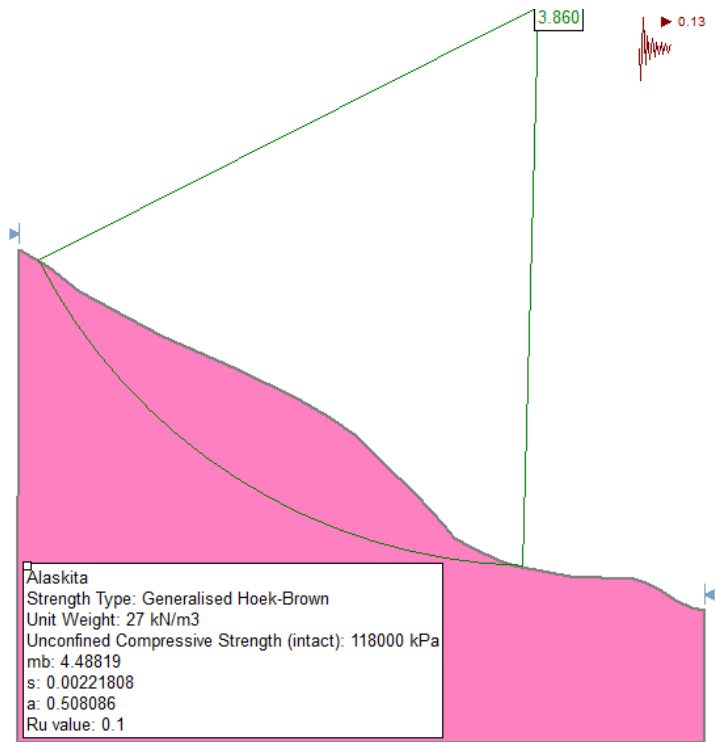
*Análisis de estabilidad de la Sección A en condiciones sísmicas.*



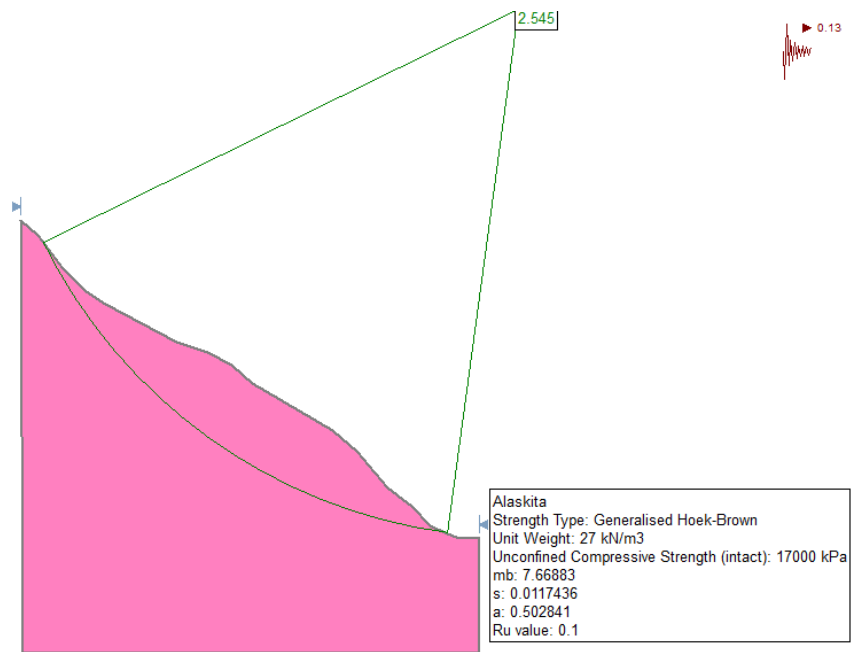
*Análisis de estabilidad de la Sección B en condiciones sísmicas.*



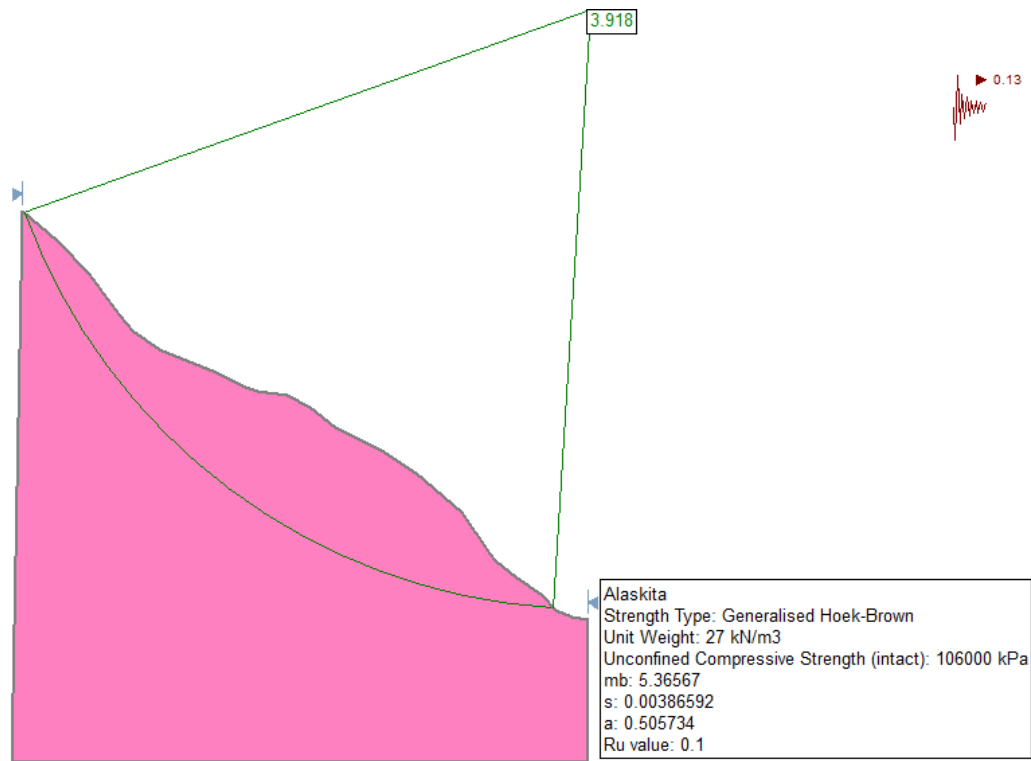
*Análisis de estabilidad de la Sección C en condiciones sísmicas.*



*Análisis de estabilidad de la Sección D en condiciones sísmicas.*

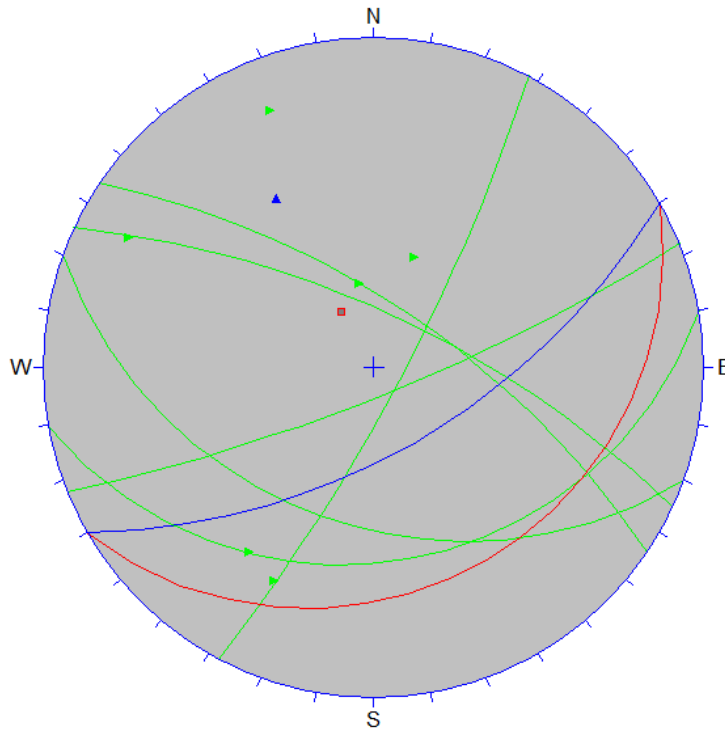


*Análisis de estabilidad de la Sección E en condiciones sísmicas.*



*Análisis de estabilidad de la Sección E en condiciones sísmicas.*

## ANEXO E: IDENTIFICACIÓN DE CUÑAS CON EL SOFTWARE DIPS



Dip	Dip Direction	ESTACION	TIPO
80	118	A	Discont
39	200	A	Discont
71	25	A	Discont
80	158	A	Discont
68	34	A	Discont
29	170	A	Discont
61	150	A	Cara talud
22	150	A	Cara sup

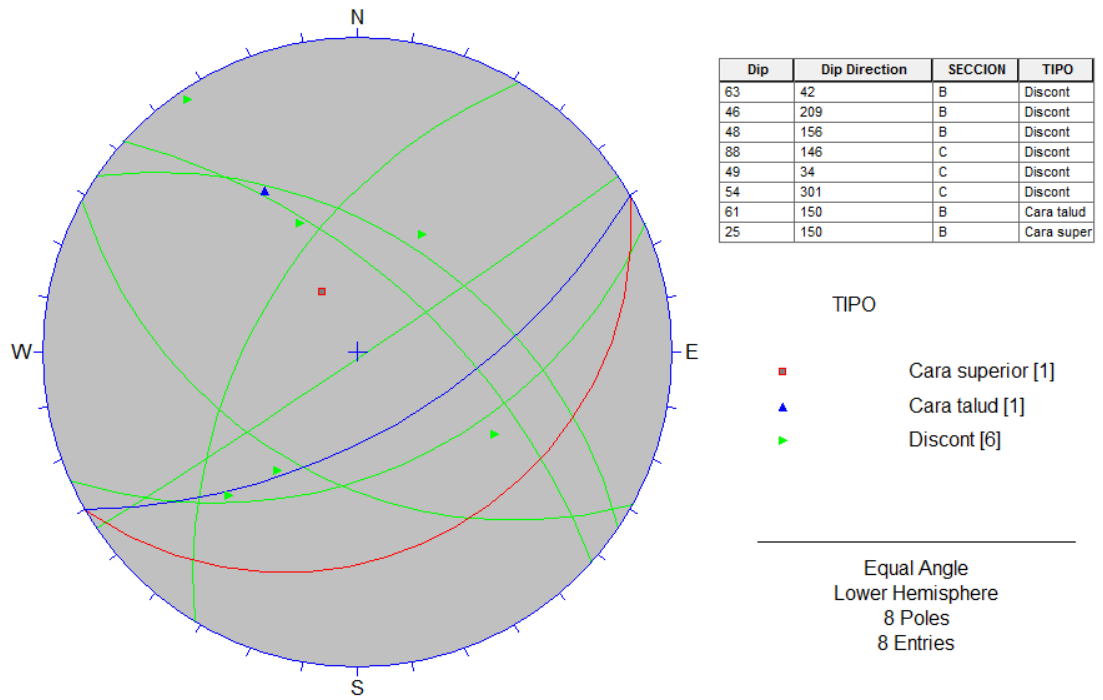
TIPO

- Cara superior [1]
- ▲ Cara talud [1]
- ▶ Discont [6]

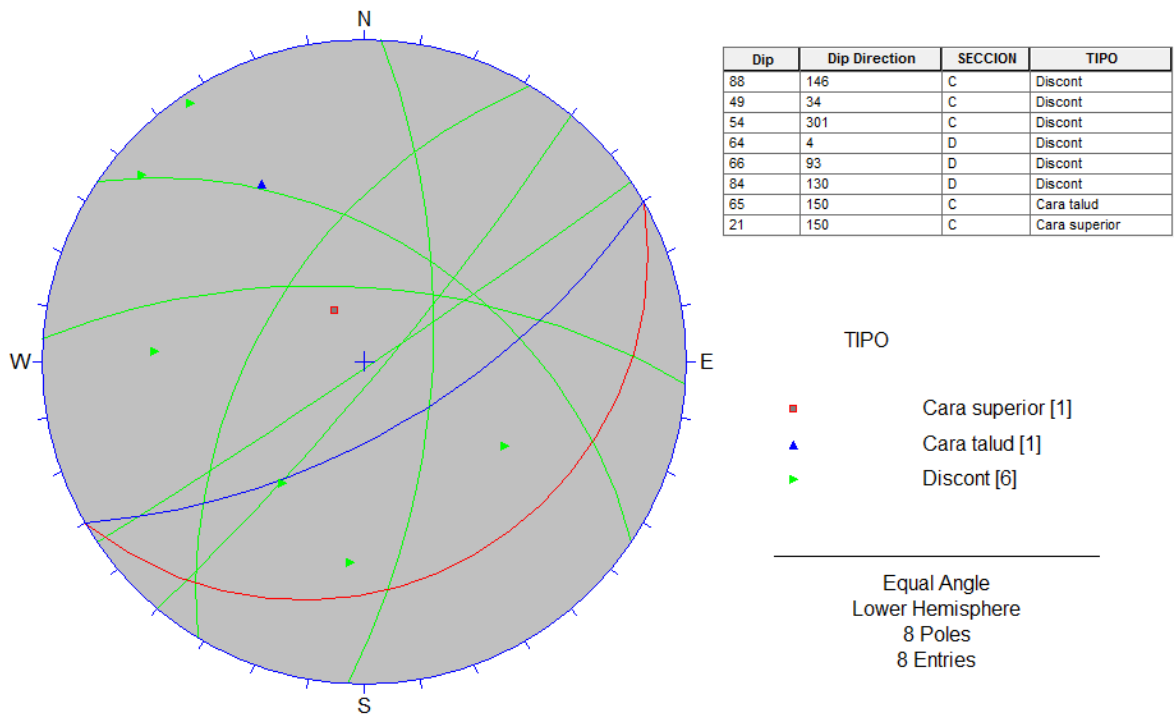
---

Equal Angle  
Lower Hemisphere  
8 Poles  
8 Entries

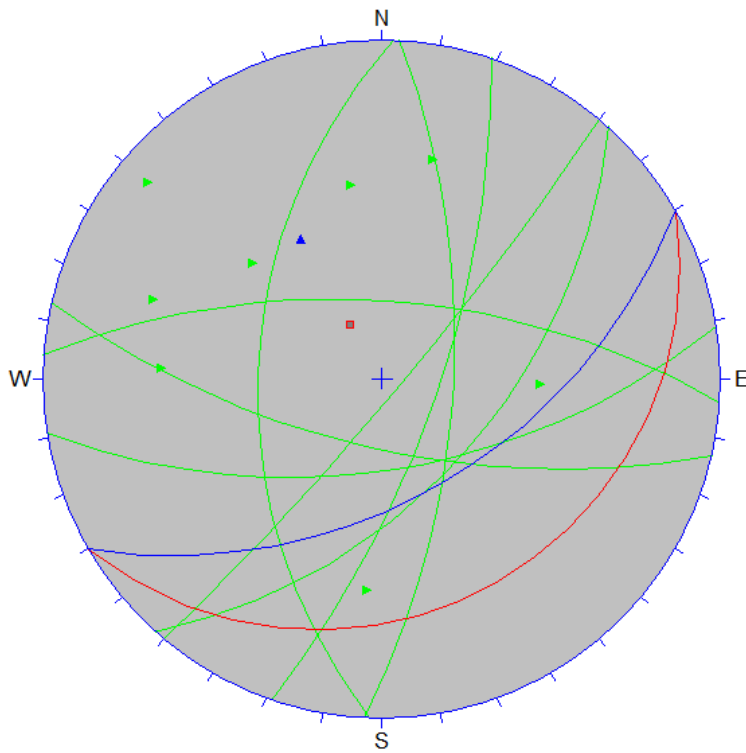
*Proyección estereográfica para la identificación de cuñas en la Sección A.*



*Proyección estereográfica para la identificación de cuñas en la Sección BC.*



*Proyección estereográfica para la identificación de cuñas en la Sección CD.*



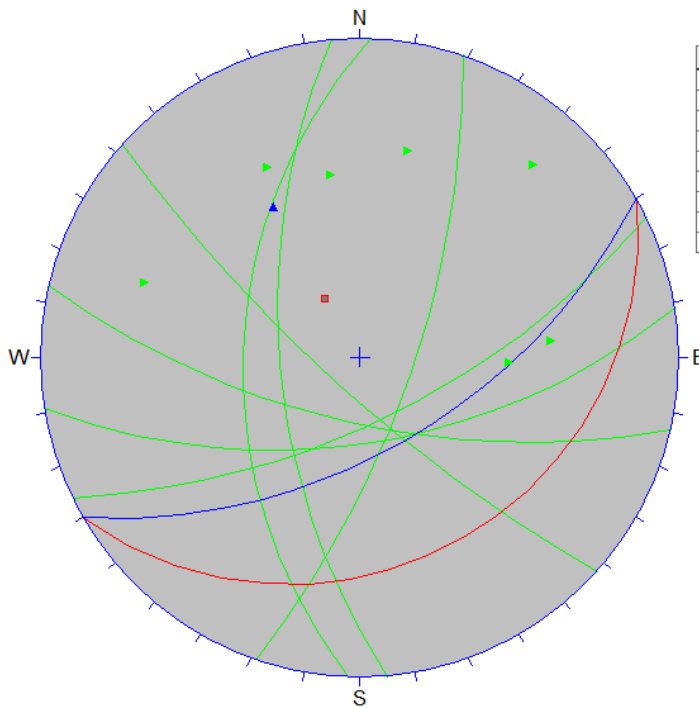
Dip	Dip Direction	SECCION	TIPO
64	4	D	Discont
66	93	D	Discont
84	130	D	Discont
54	132	D	Discont
60	171	E	Discont
71	109	E	Discont
50	272	E	Discont
67	193	E	Discont
51	150	E	Cara talud
21	150	E	Cara superior

TIPO

- Cara superior [1]
- ▲ Cara talud [1]
- ▶ Discont [8]

Equal Angle  
Lower Hemisphere  
10 Poles  
10 Entries

*Proyección estereográfica para la identificación de cuñas en la Sección DE.*



Dip	Dip Direction	SECCION	TIPO
60	171	E	Discont
71	109	E	Discont
50	272	E	Discont
67	193	E	Discont
67	154	F	Discont
78	222	F	Discont
62	285	F	Discont
57	150	F	Cara talud
24	150	F	Cara superior

TIPO

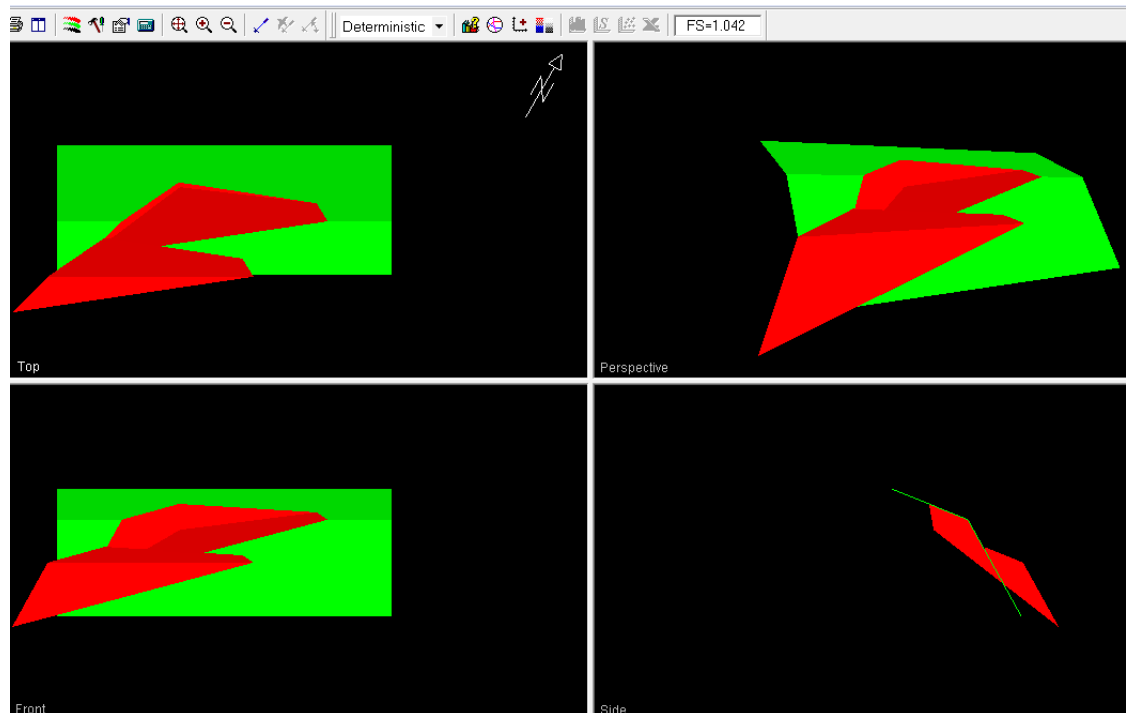
- Cara superior [1]
- ▲ Cara talud [1]
- ▶ Discont [7]

Equal Angle  
Lower Hemisphere  
9 Poles  
9 Entries

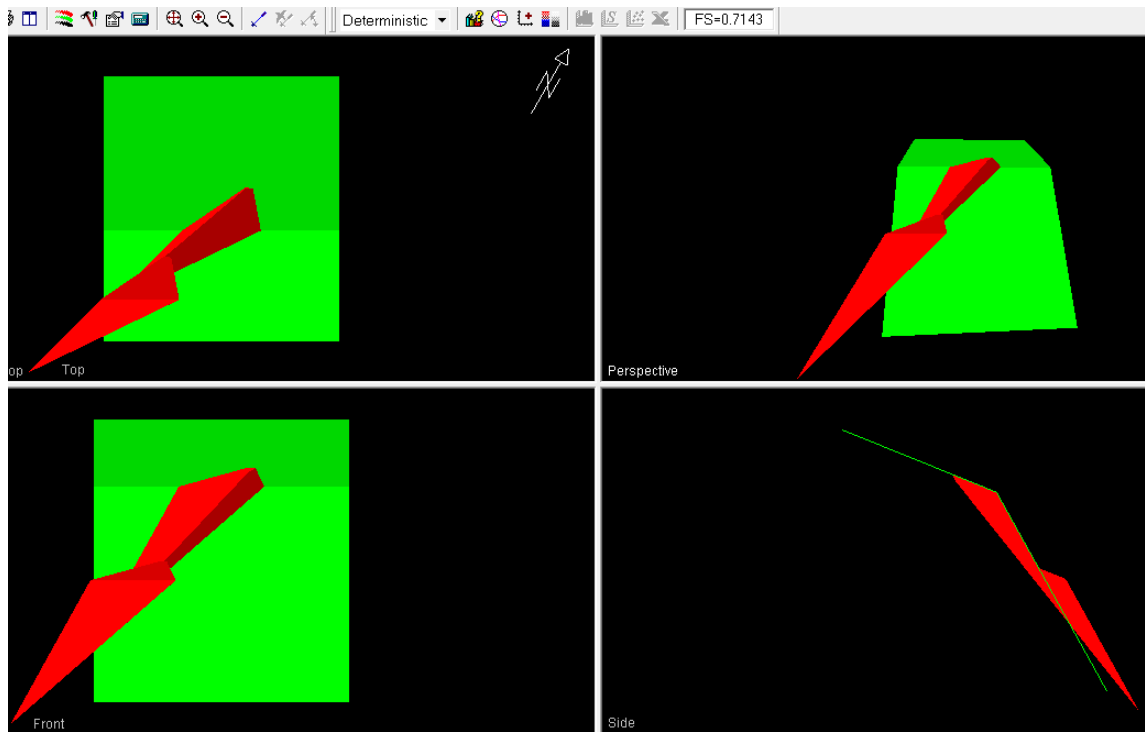
*Proyección estereográfica para la identificación de cuñas en la Sección EF.*

## ANEXO F: MODELAMIENTO CON EL SOFTWARE SWEDGE

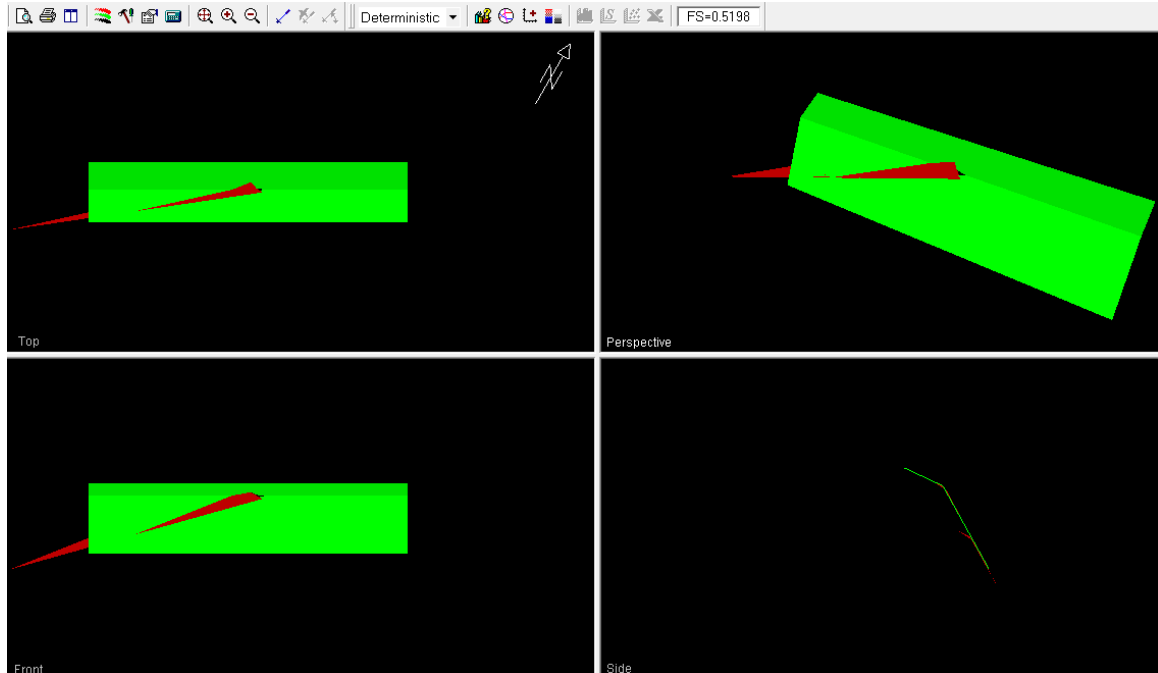
### PARTE 1: ANALISIS DE ESTABILIDAD DE CUÑAS EN CONDICIONES NORMALES



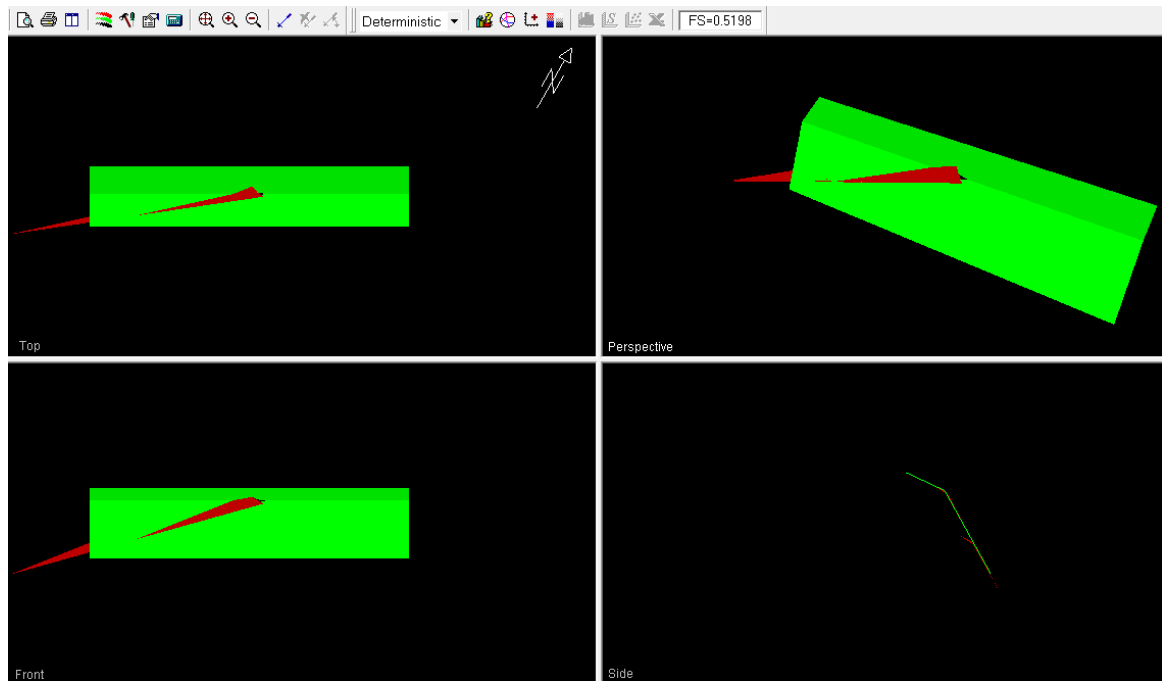
*Análisis de estabilidad de la Sección A-Cuña 1 en condiciones normales.*



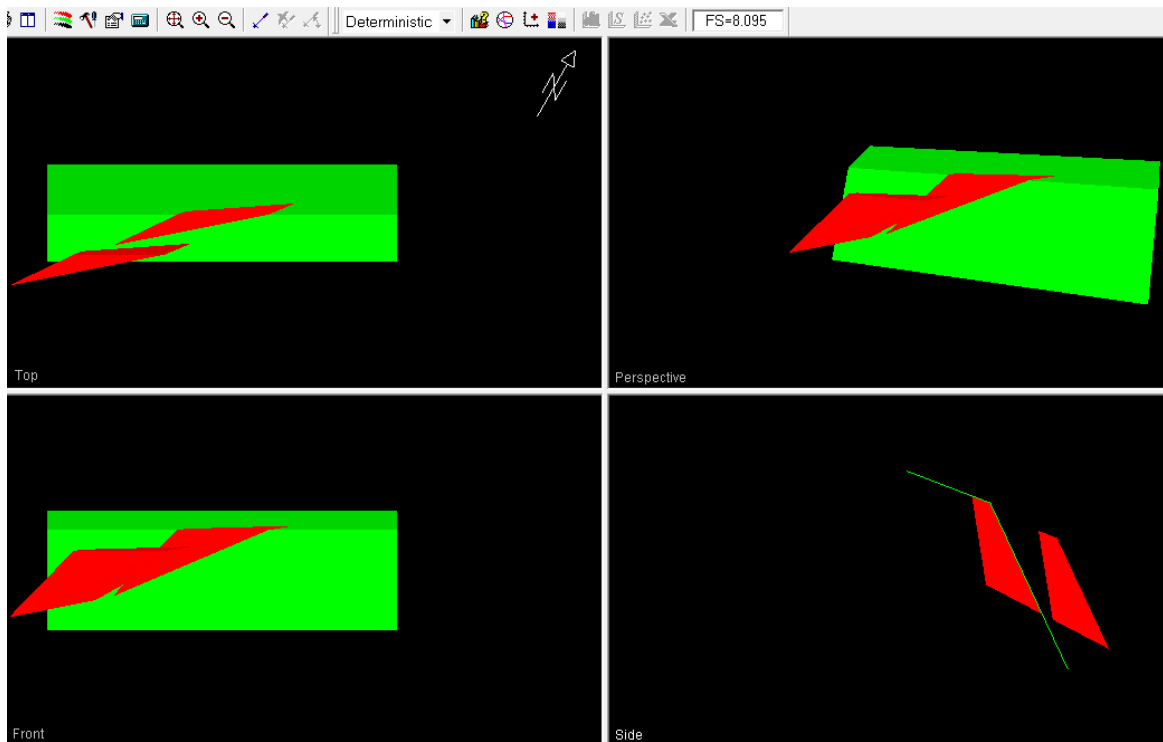
*Análisis de estabilidad de la Sección A-Cuña 2 en condiciones normales.*



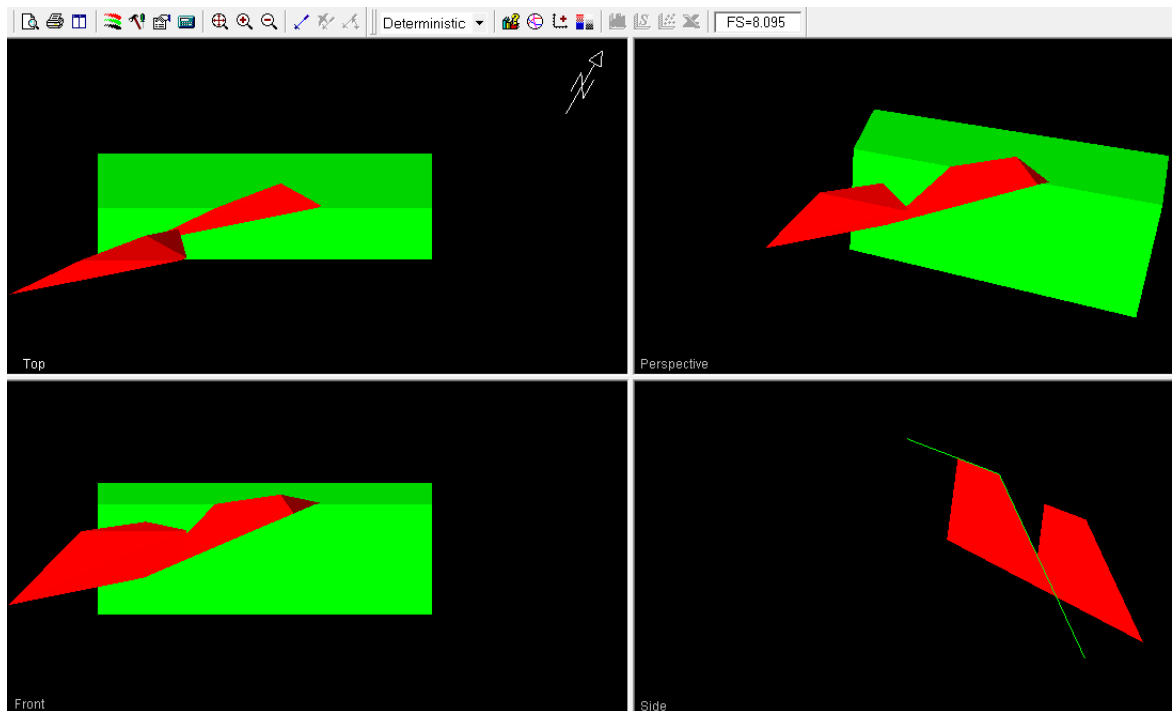
*Análisis de estabilidad de la Sección BC-Cuña 1 en condiciones normales.*



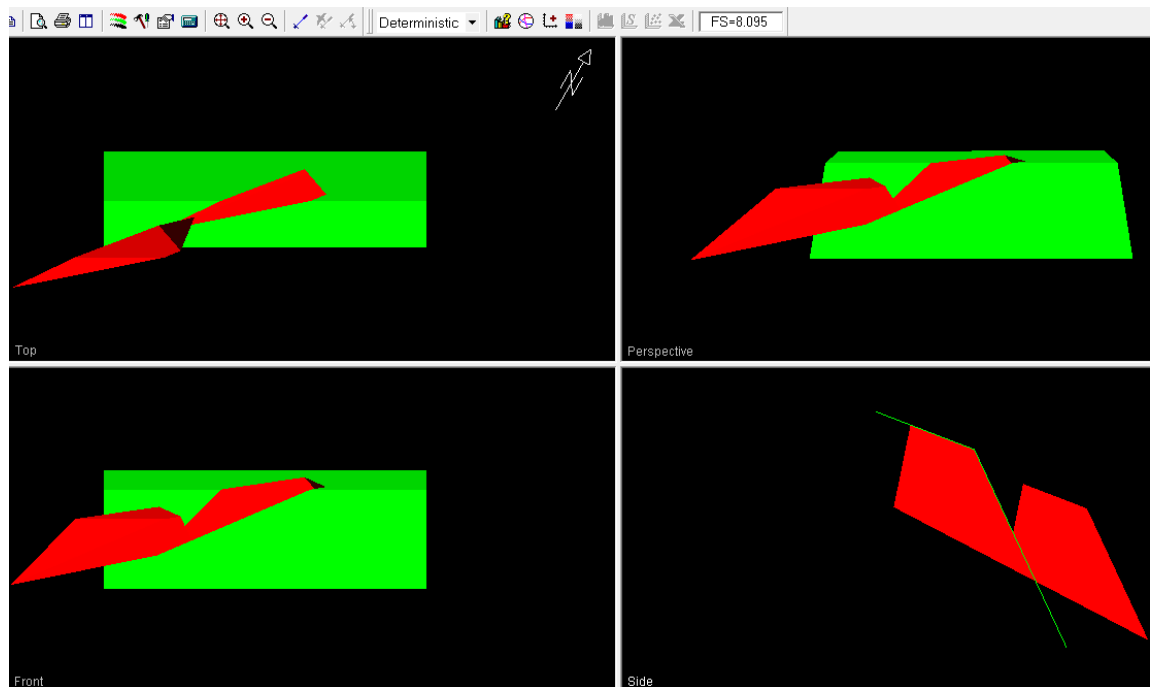
*Análisis de estabilidad de la Sección BC-Cuña 2 en condiciones normales.*



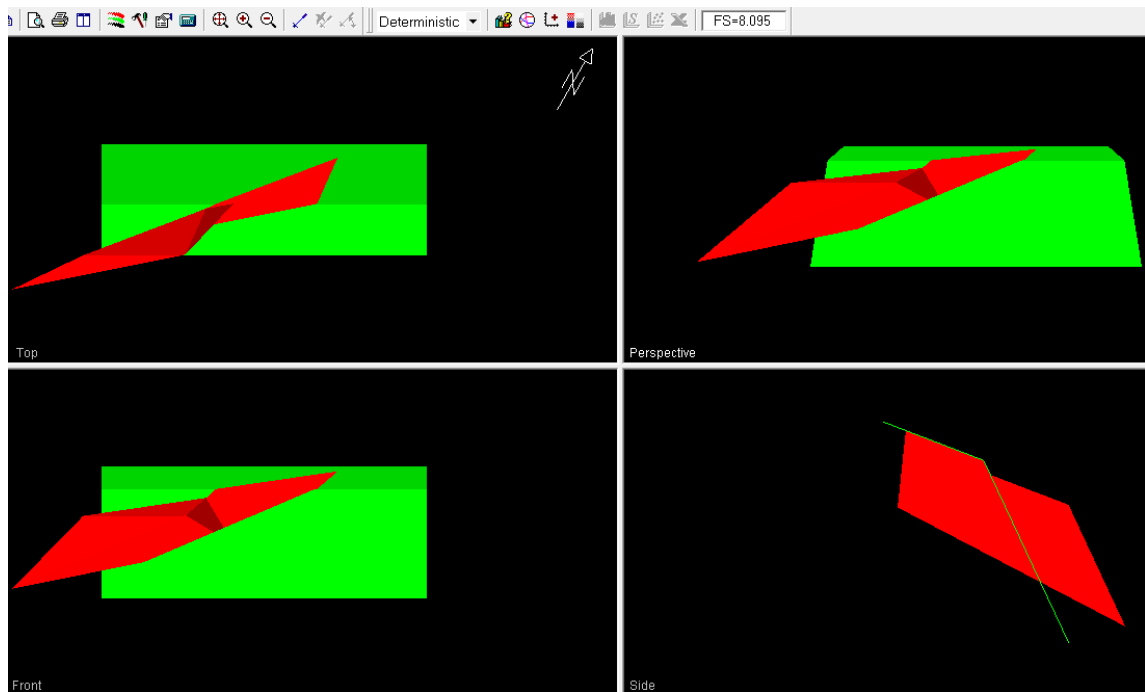
*Análisis de estabilidad de la Sección CD-Cuña 1 en condiciones normales.*



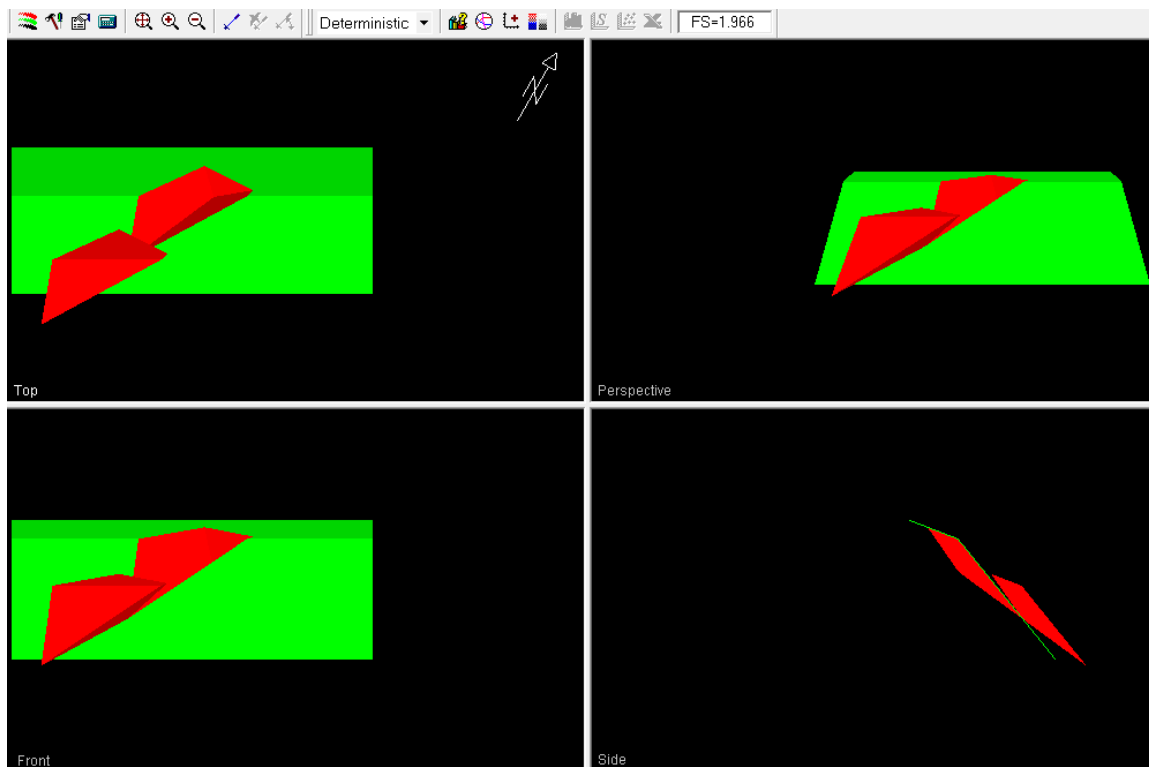
*Análisis de estabilidad de la Sección CD-Cuña 2 en condiciones normales.*



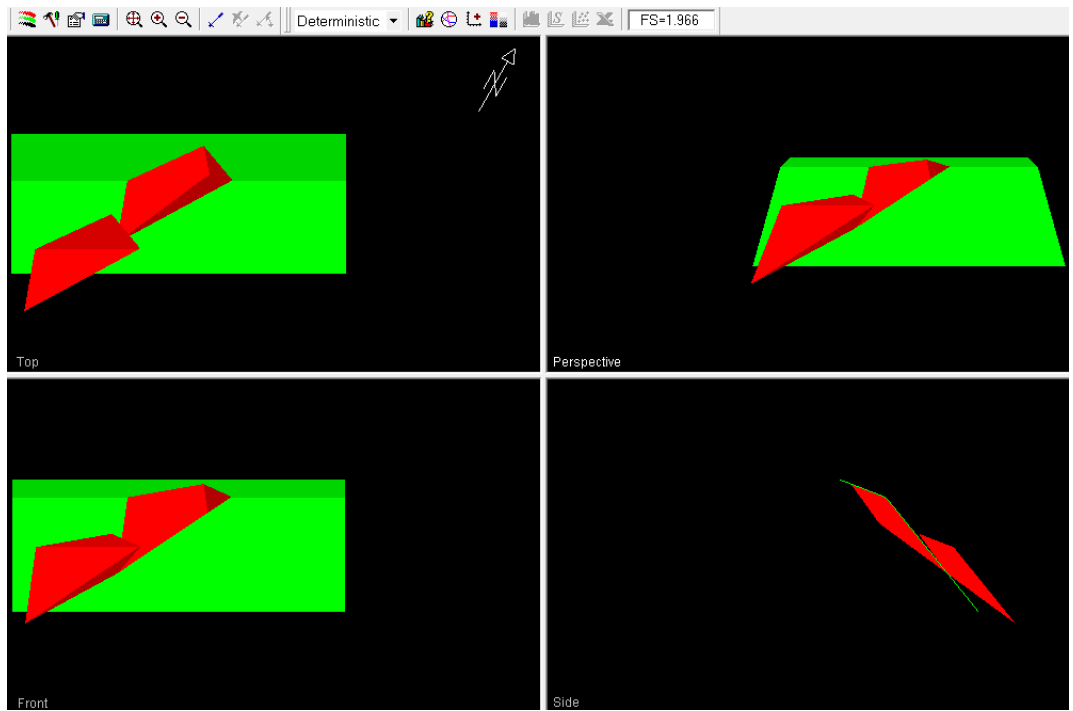
*Análisis de estabilidad de la Sección CD-Cuña 3 en condiciones normales.*



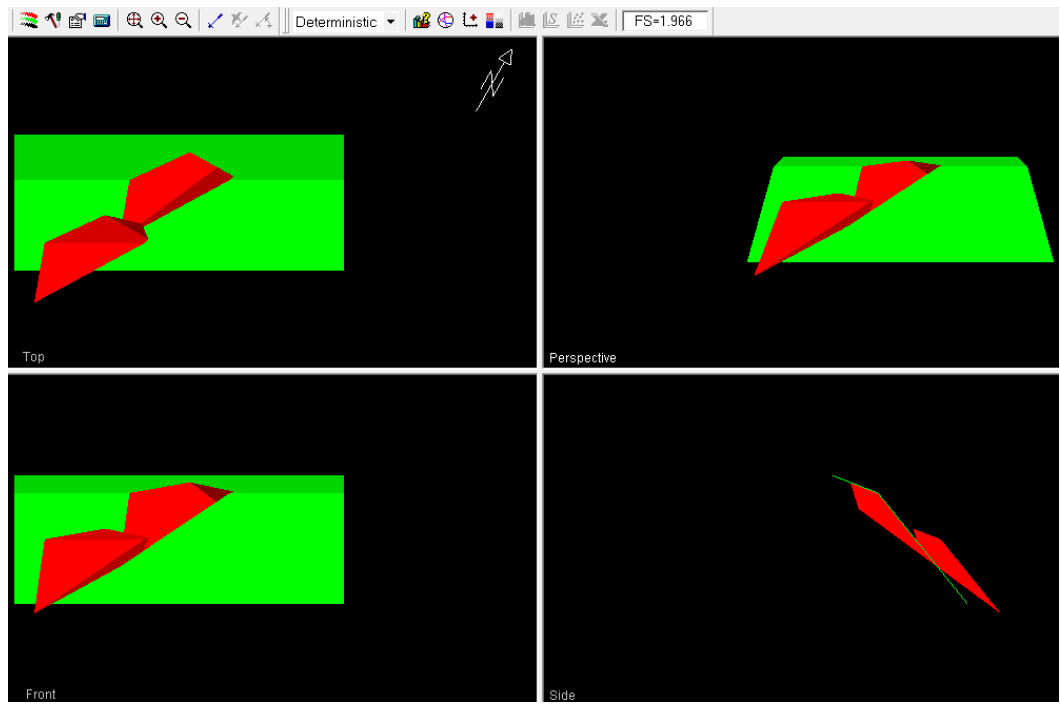
*Análisis de estabilidad de la Sección CD-Cuña 4 en condiciones normales.*



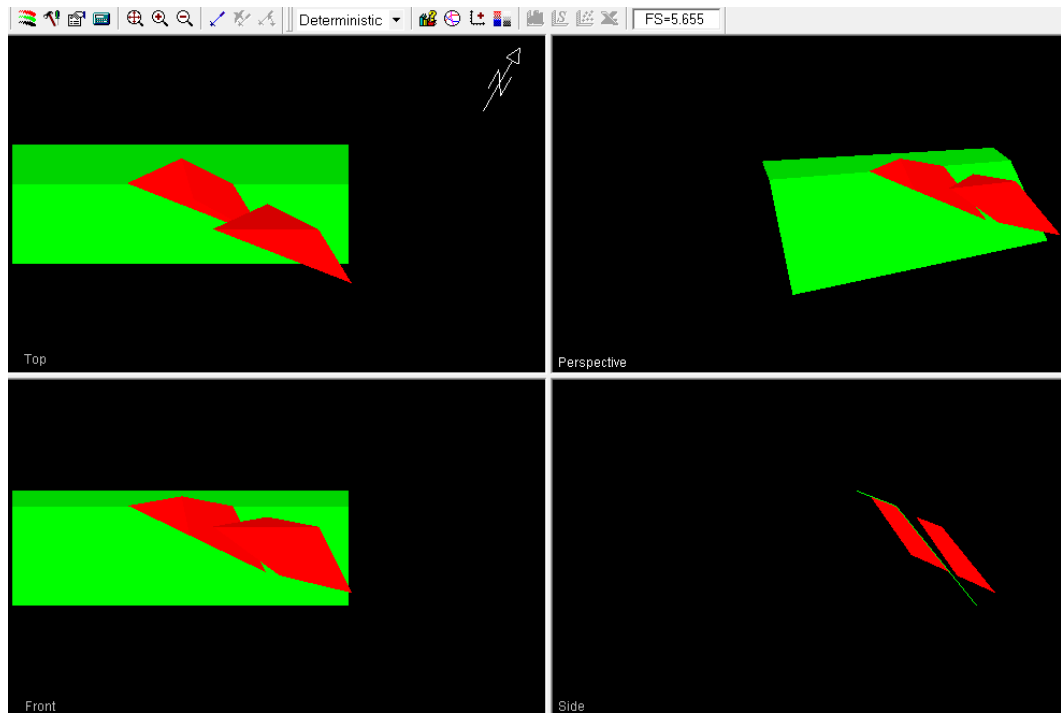
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 1 en condiciones normales.*



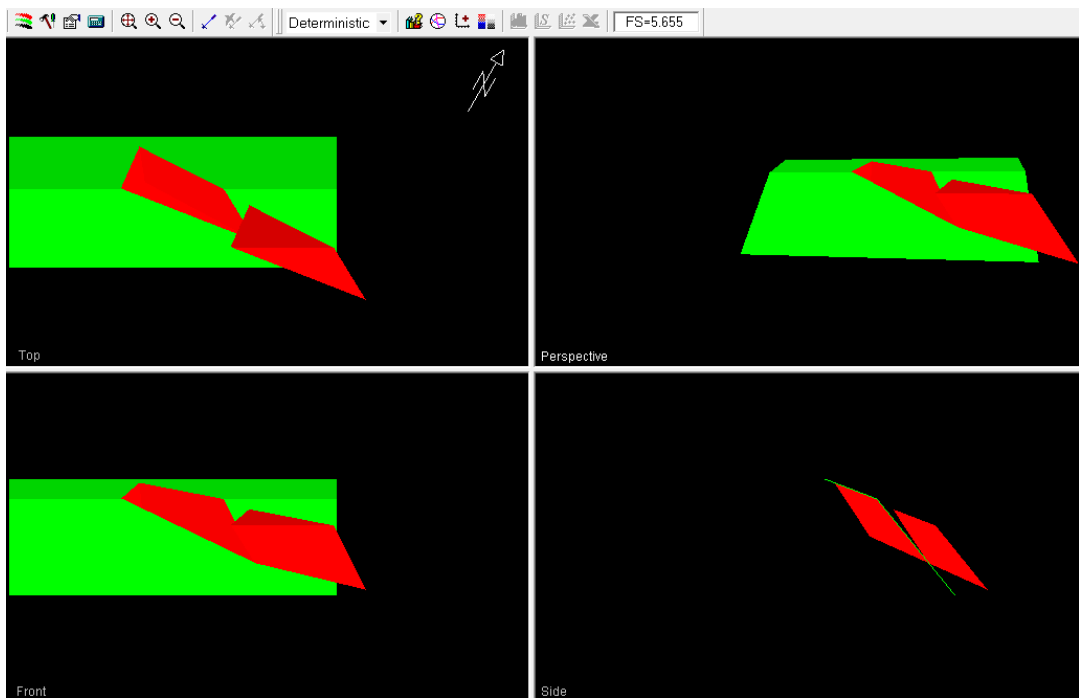
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 2 en condiciones normales.*



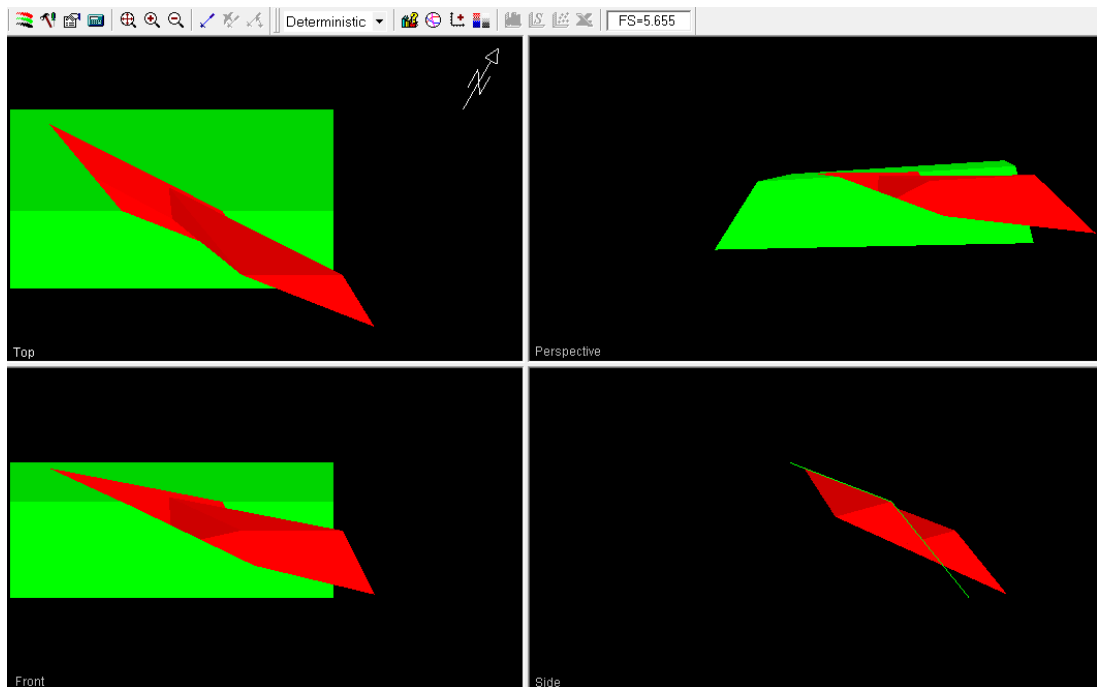
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 3 en condiciones normales.*



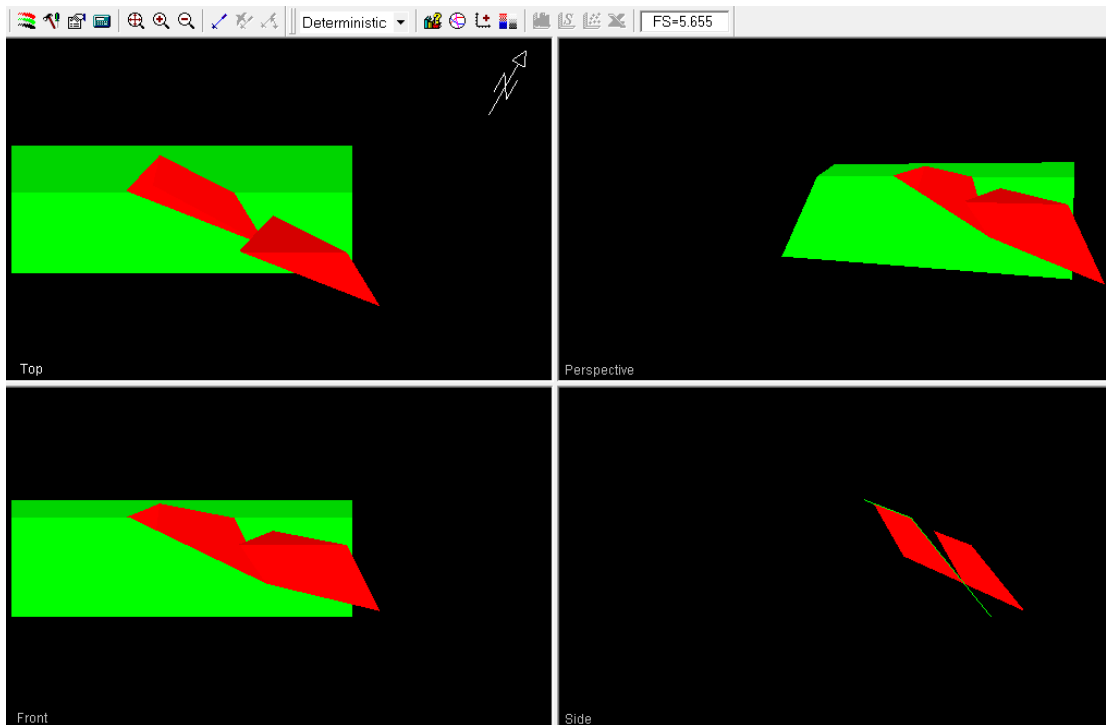
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 4 en condiciones normales.*



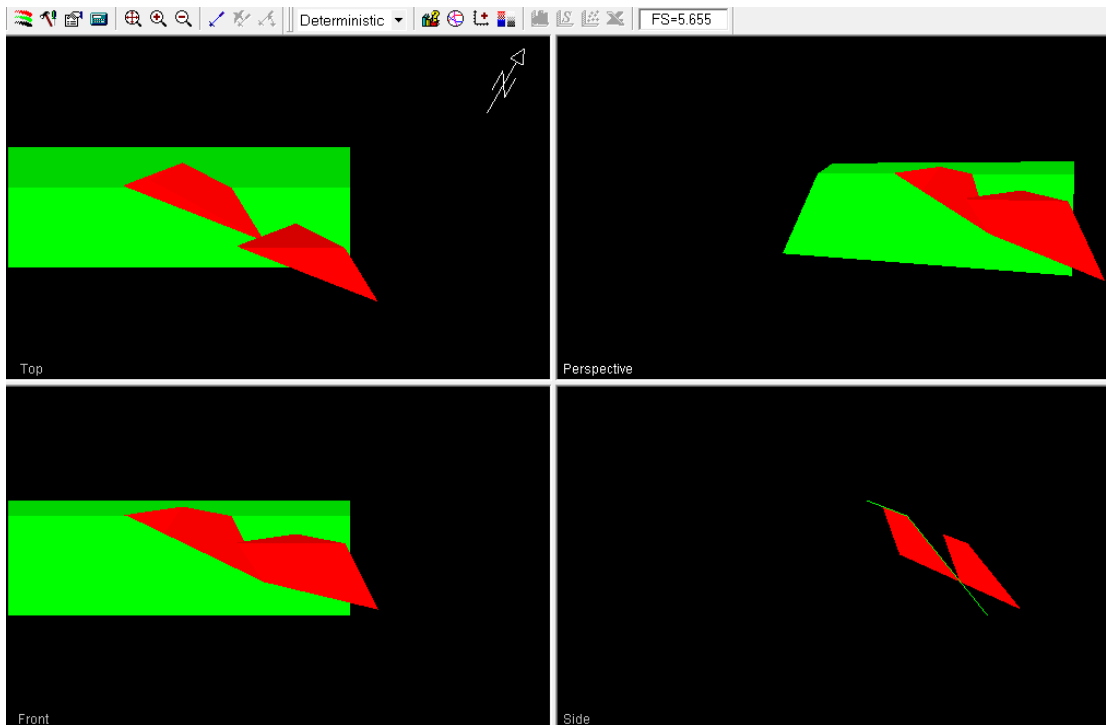
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 5 en condiciones normales.*



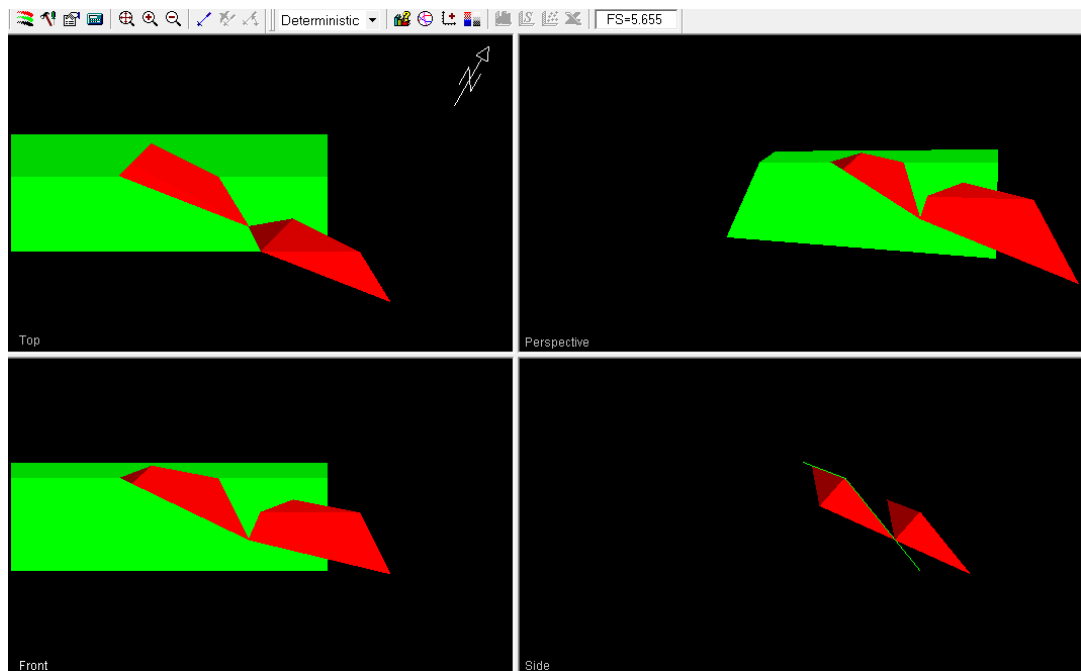
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 6 en condiciones normales.*



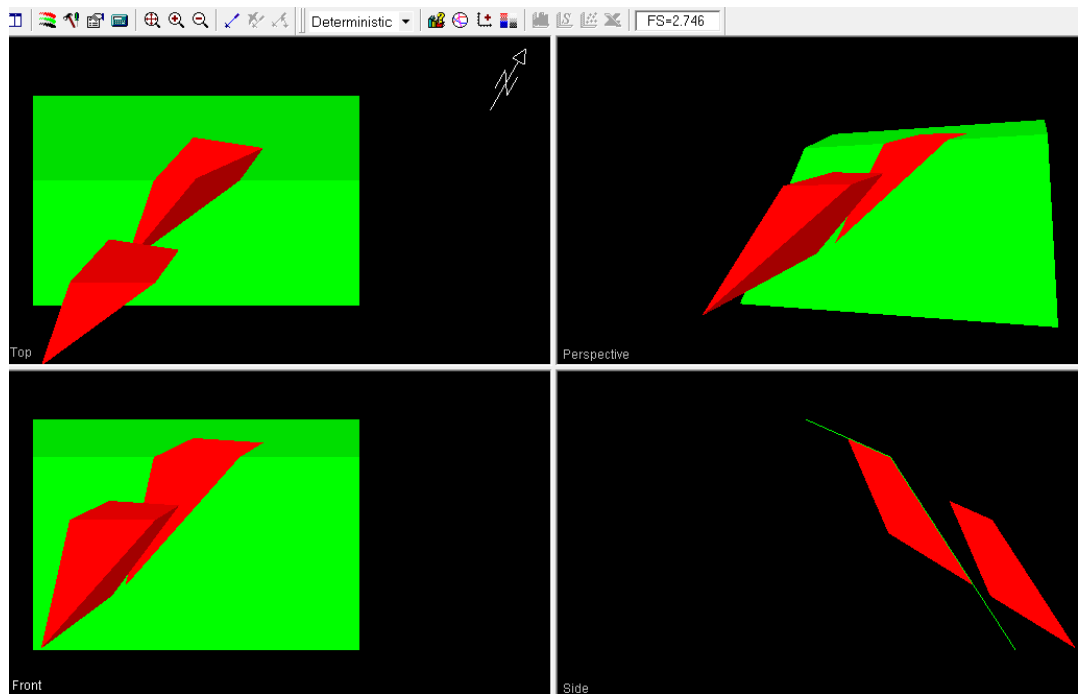
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 7 en condiciones normales.*



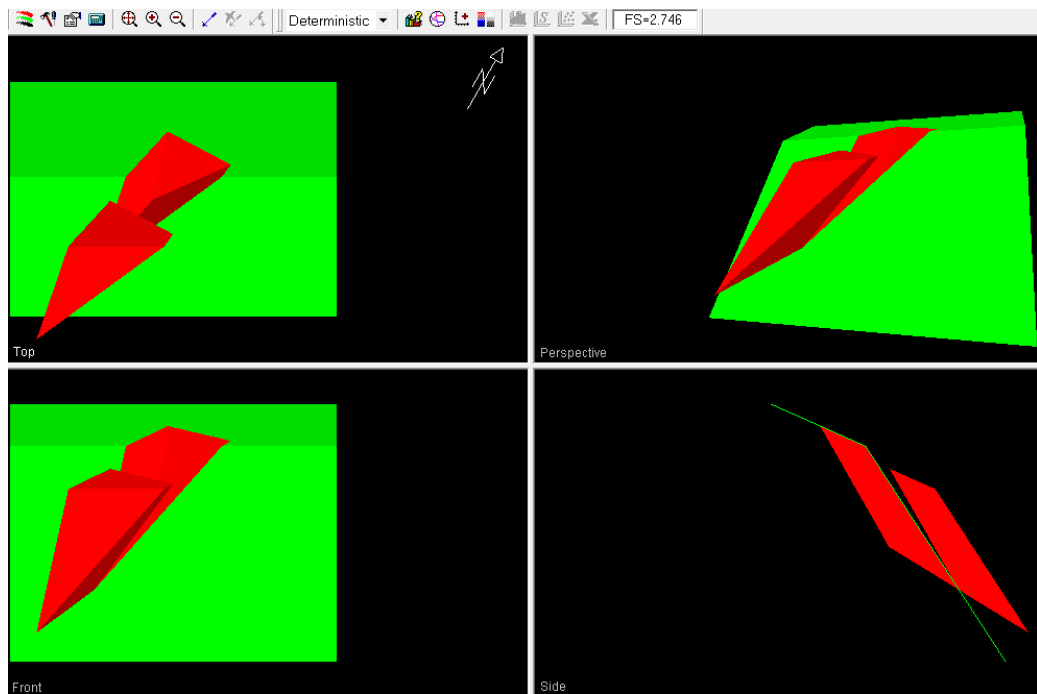
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 8 en condiciones normales.*



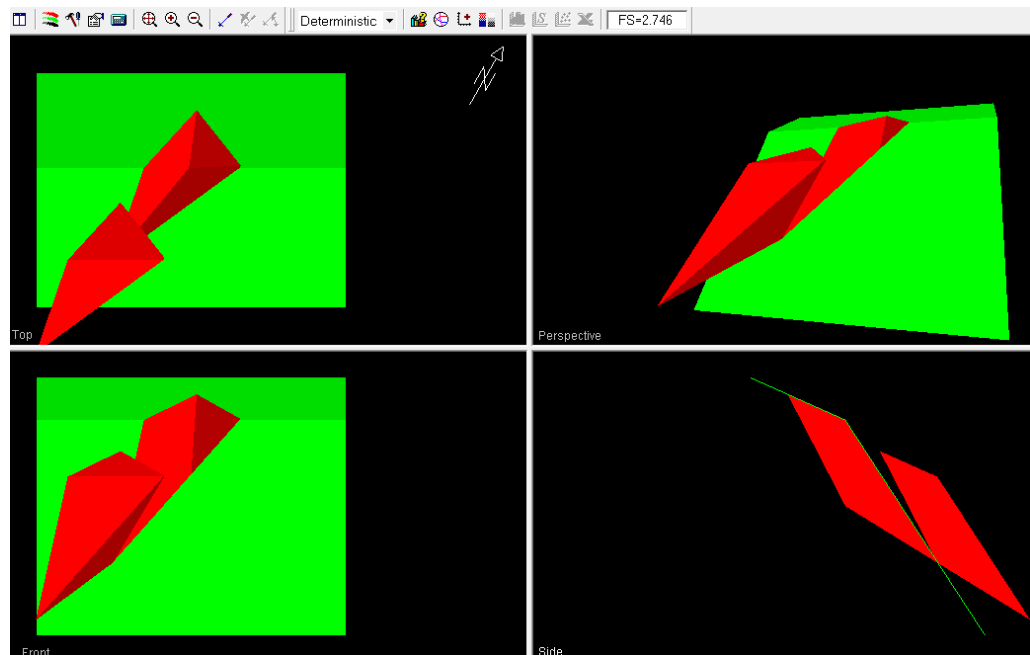
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 9 en condiciones normales.*



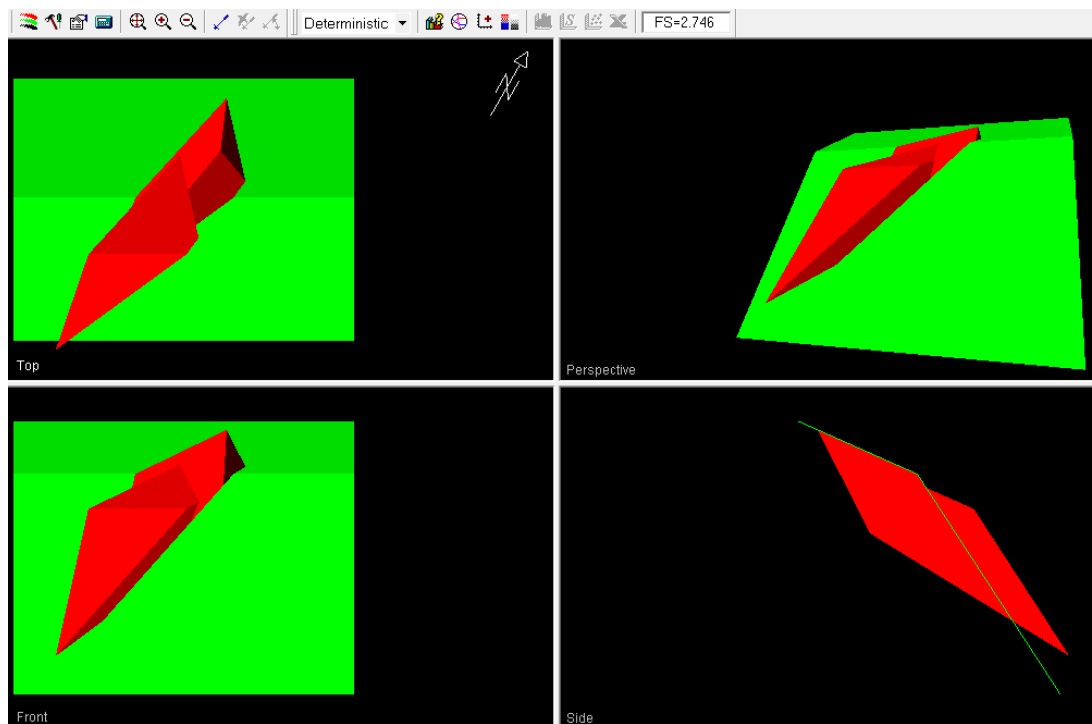
*Análisis de estabilidad de la Sección EF-Cuña 1 en condiciones normales.*



*Análisis de estabilidad de la Sección EF-Cuña 2 en condiciones normales.*



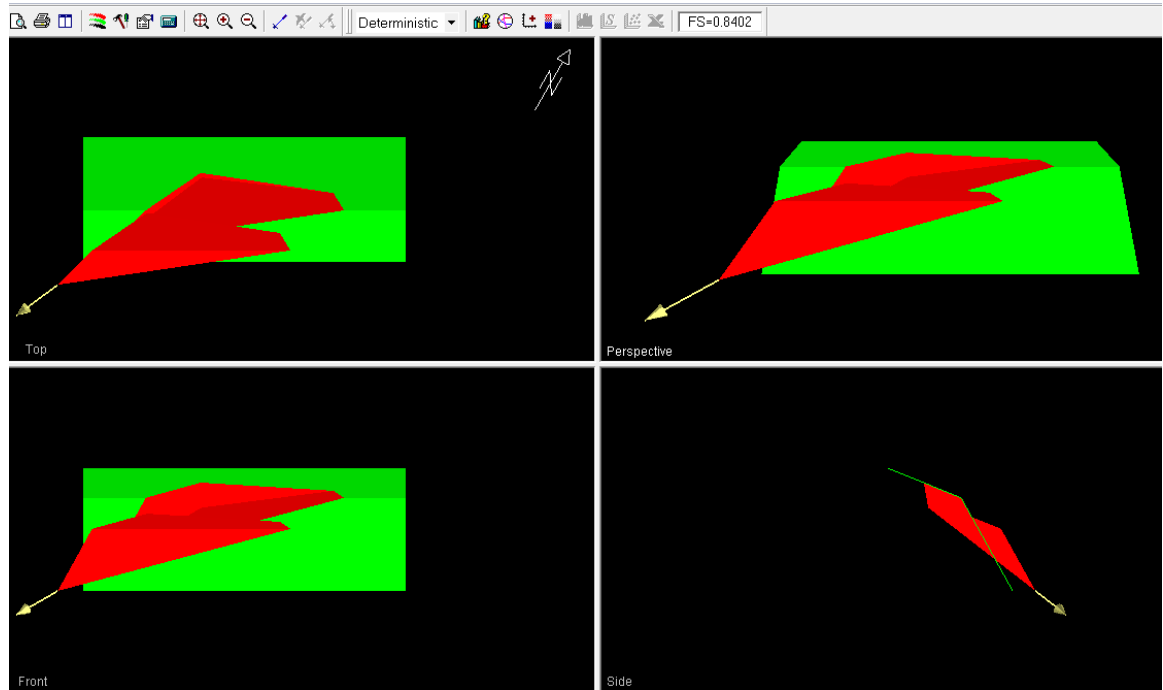
*Análisis de estabilidad de la Sección EF-Cuña 3 en condiciones normales.*



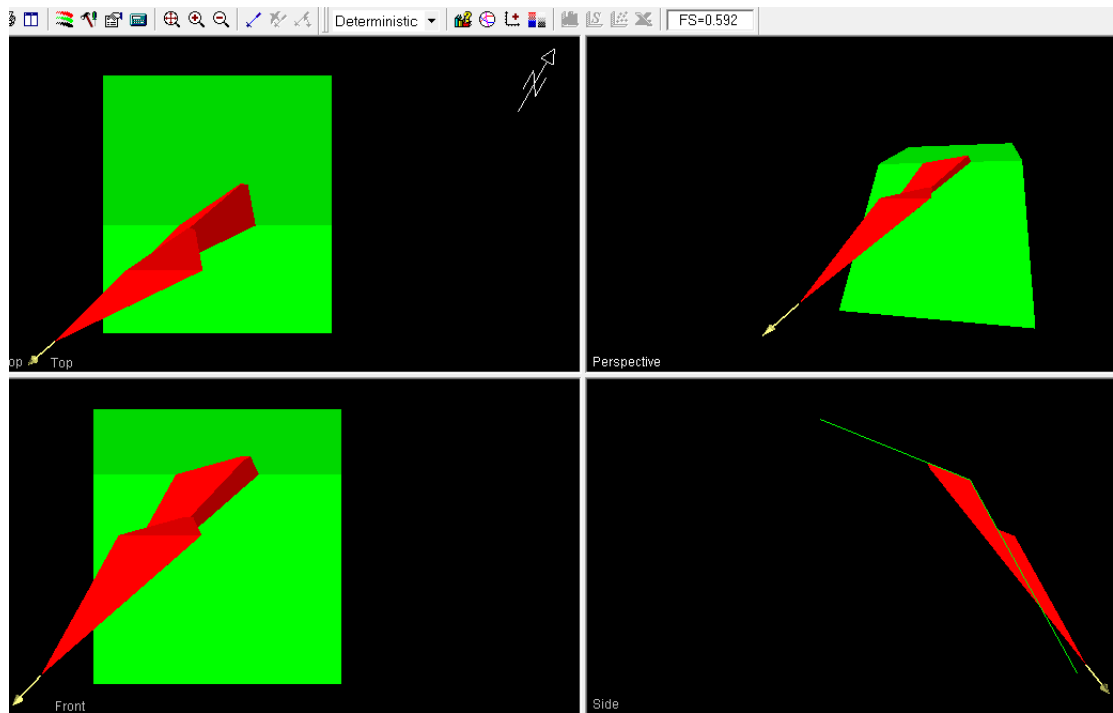
*Análisis de estabilidad de la Sección EF-Cuña 4 en condiciones normales.*

## ANEXO F

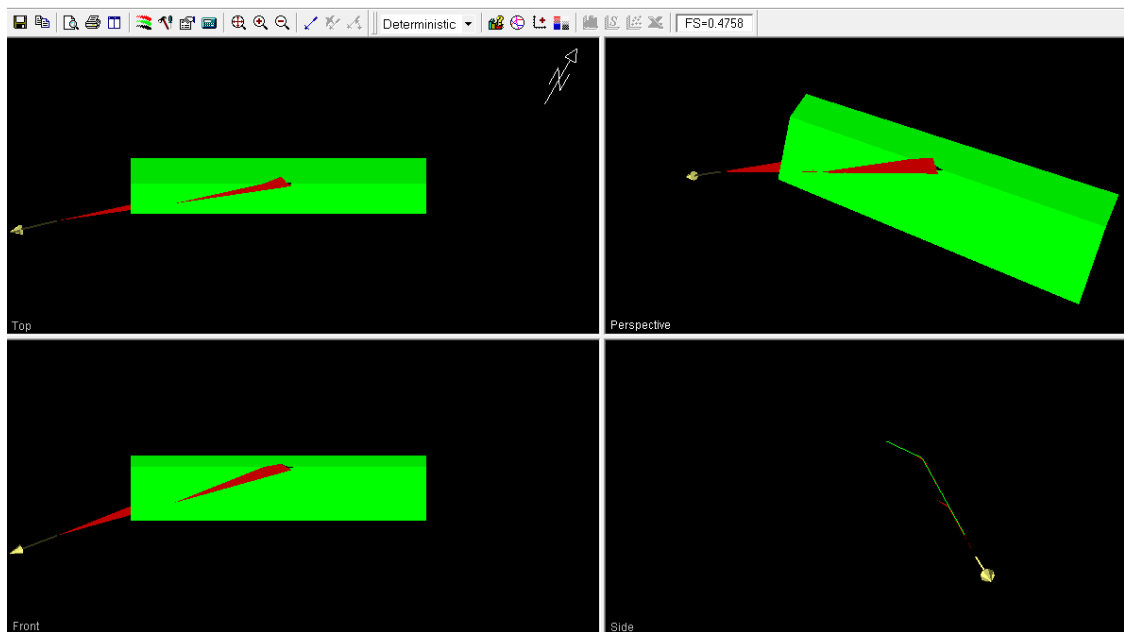
### PARTE 2: ANALISIS DE ESTABILIDAD DE CUÑAS EN CONDICIONES SÍSMICAS



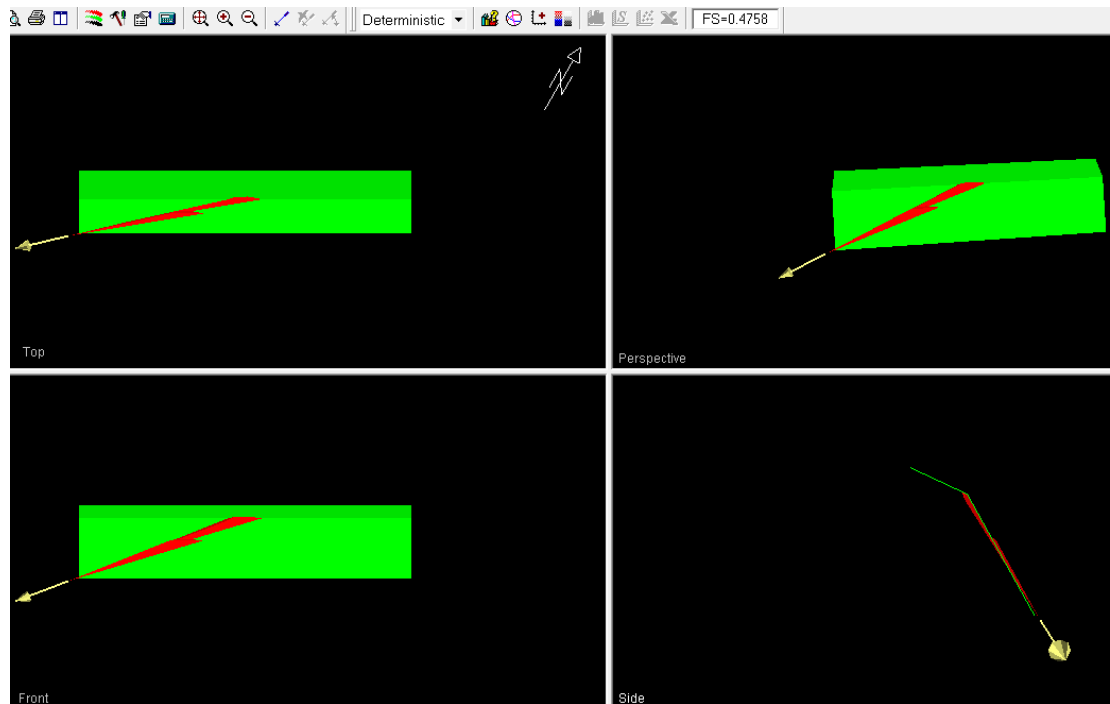
*Análisis de estabilidad de la Sección A-Cuña 1 en condiciones sísmicas.*



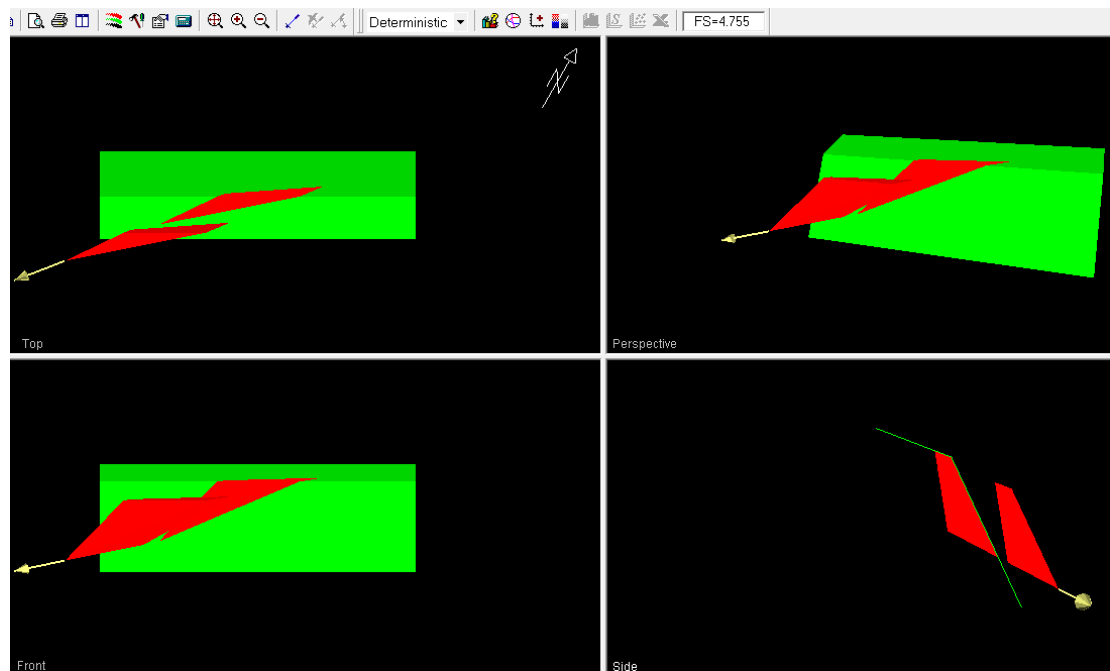
*Análisis de estabilidad de la Sección A-Cuña 2 en condiciones sísmicas.*



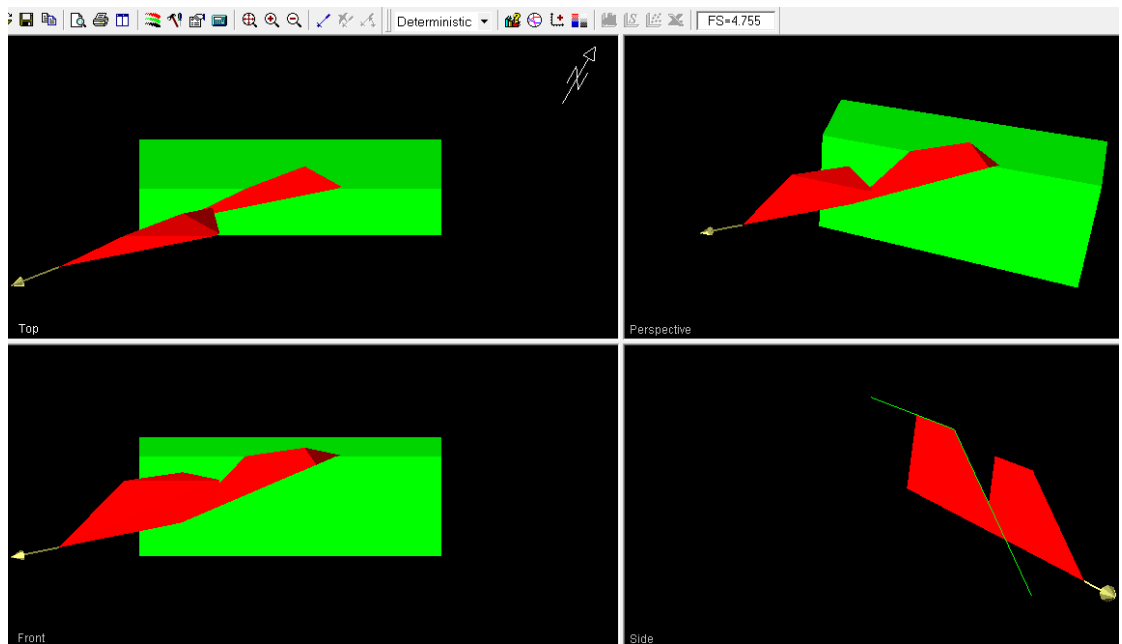
*Análisis de estabilidad de la Sección BC-Cuña 1 en condiciones sísmicas.*



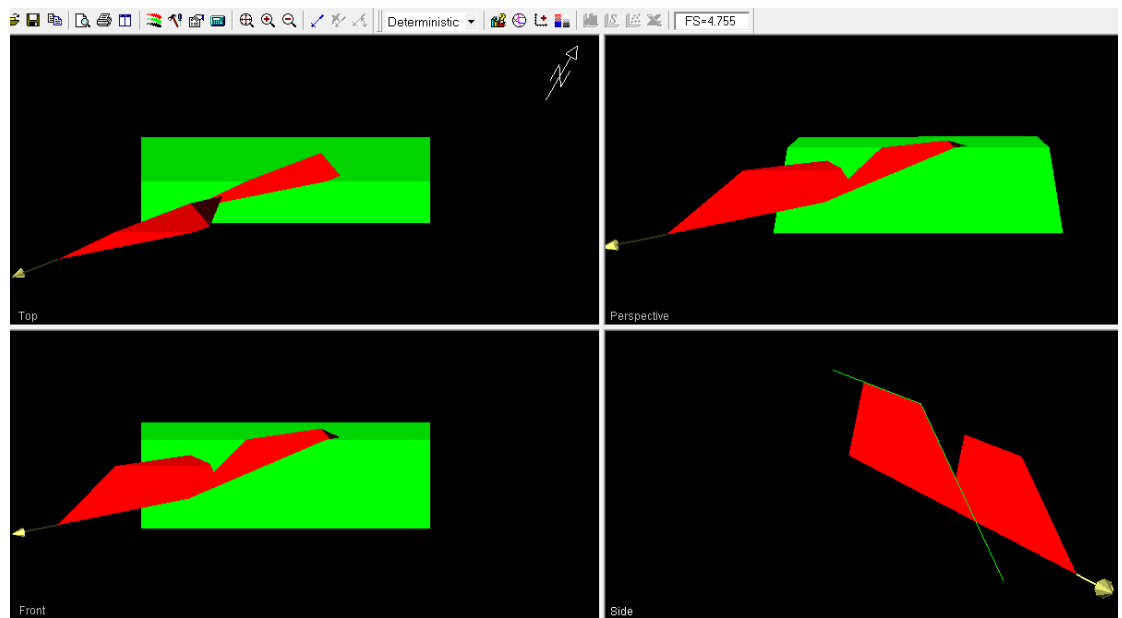
*Análisis de estabilidad de la Sección BC-Cuña 2 en condiciones sísmicas.*



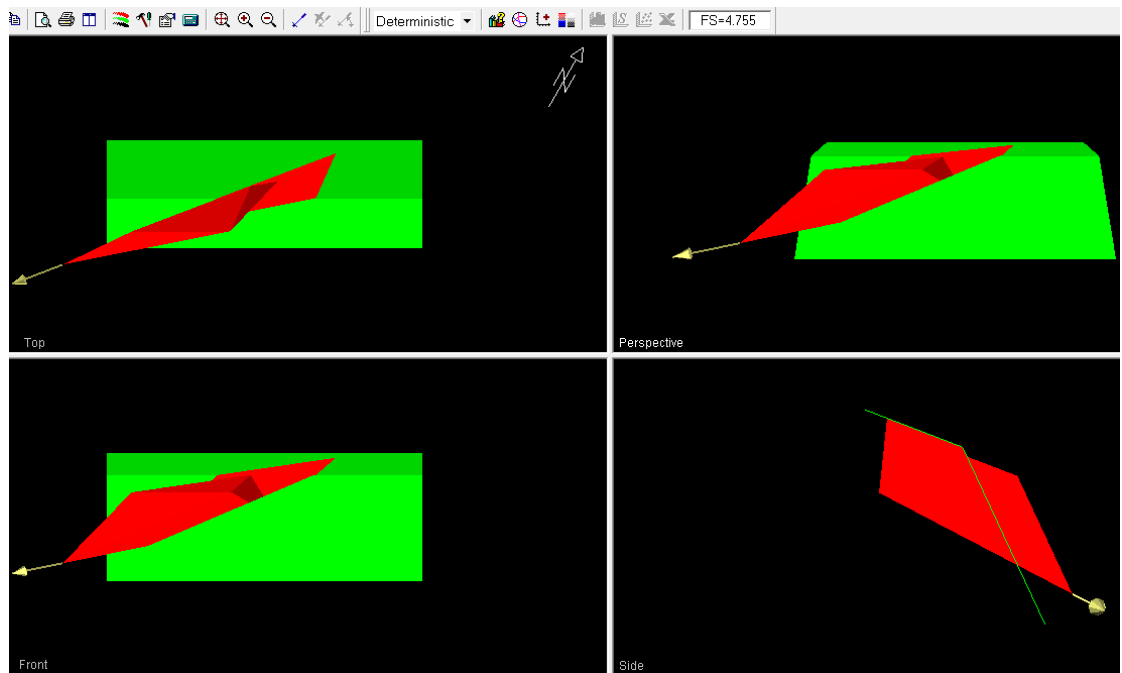
*Análisis de estabilidad de la Sección CD-Cuña 1 en condiciones sísmicas.*



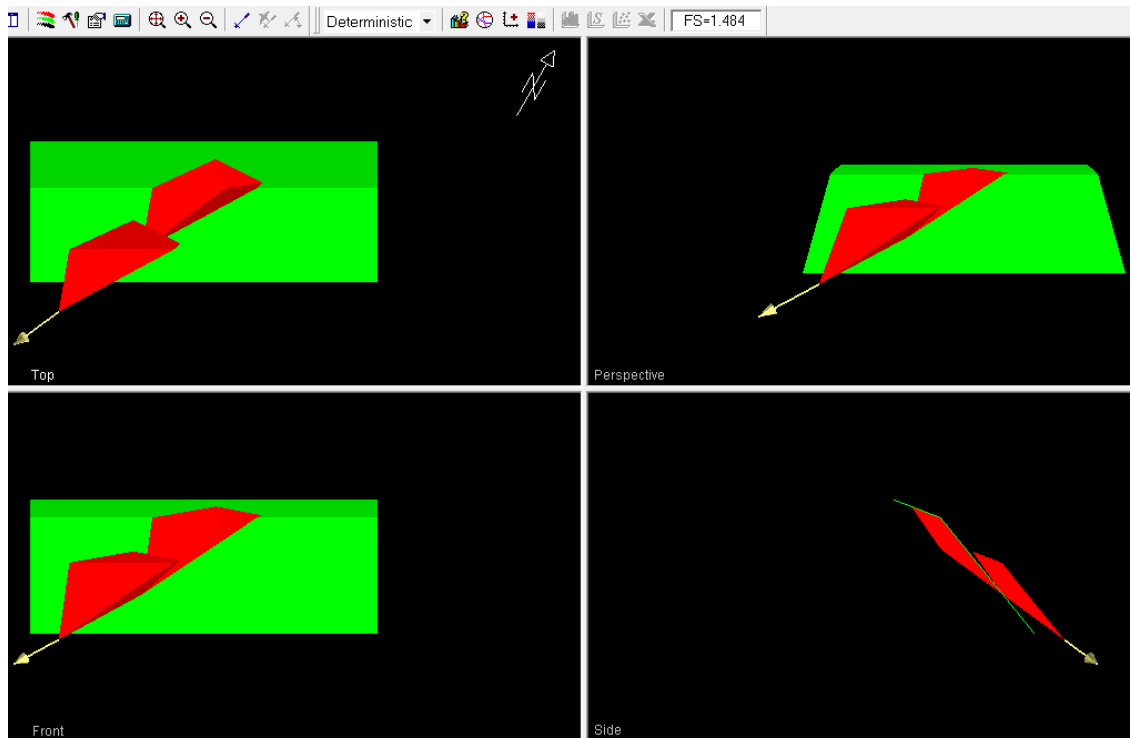
*Análisis de estabilidad de la Sección CD-Cuña 2 en condiciones sísmicas.*



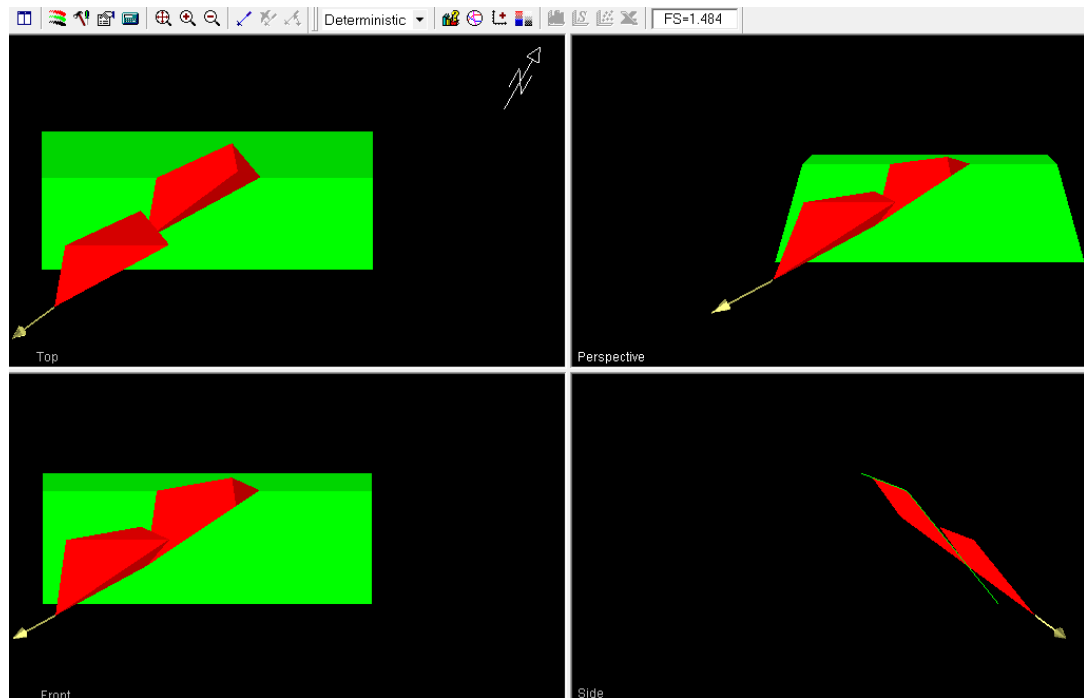
*Análisis de estabilidad de la Sección CD-Cuña 3 en condiciones sísmicas.*



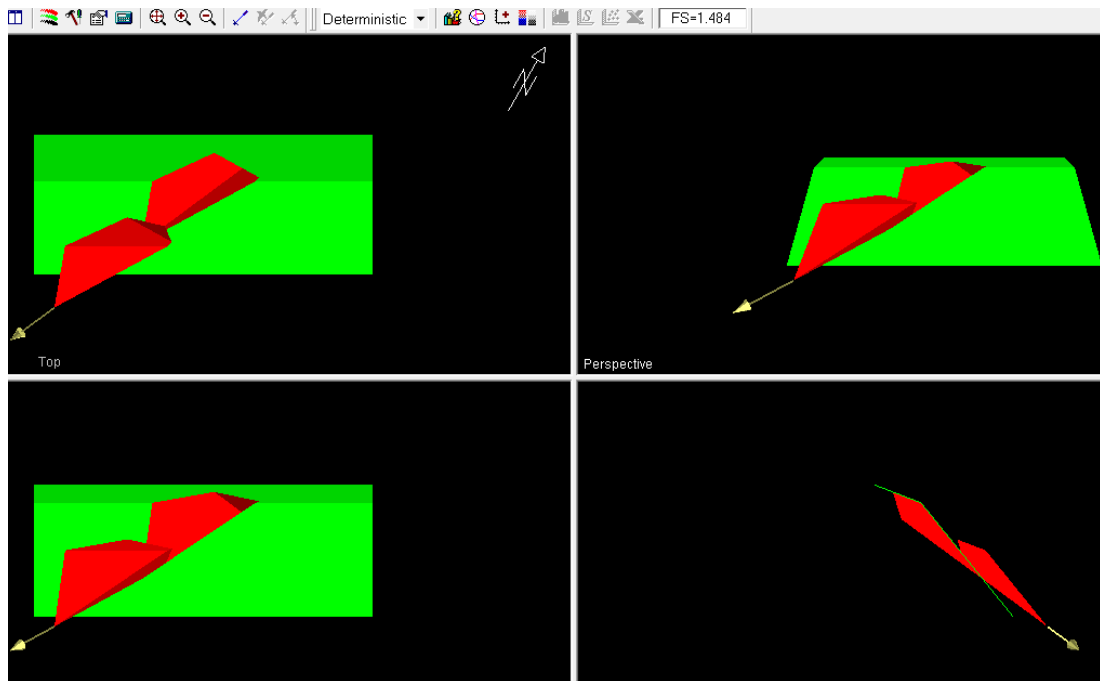
*Análisis de estabilidad de la Sección CD-Cuña 4 en condiciones sísmicas.*



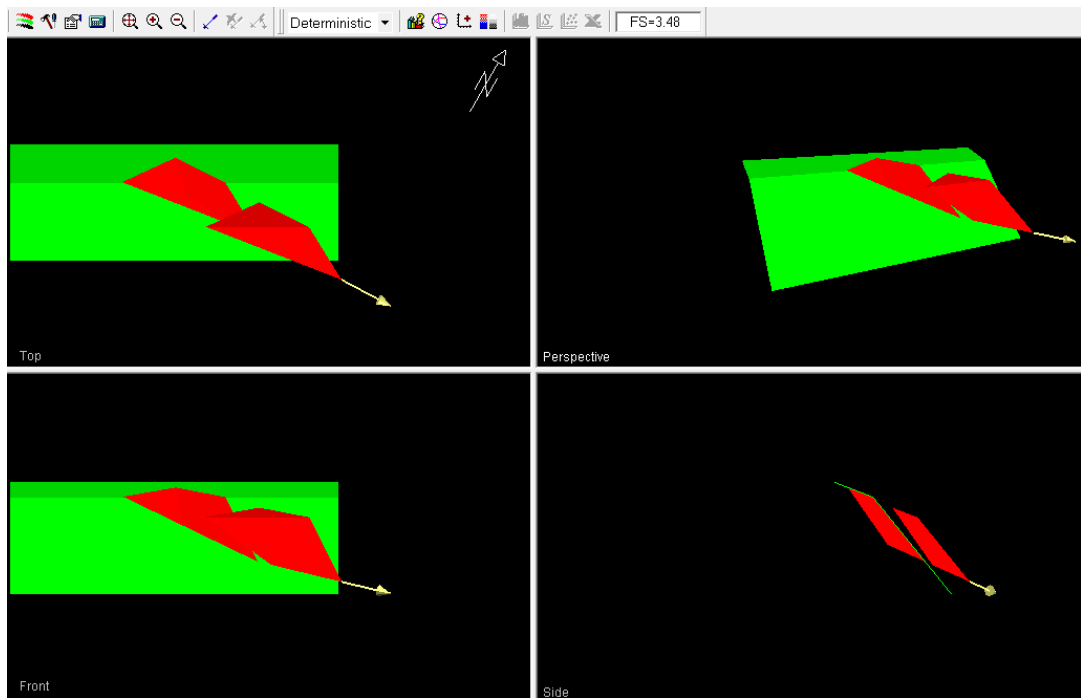
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 1 en condiciones sísmicas.*



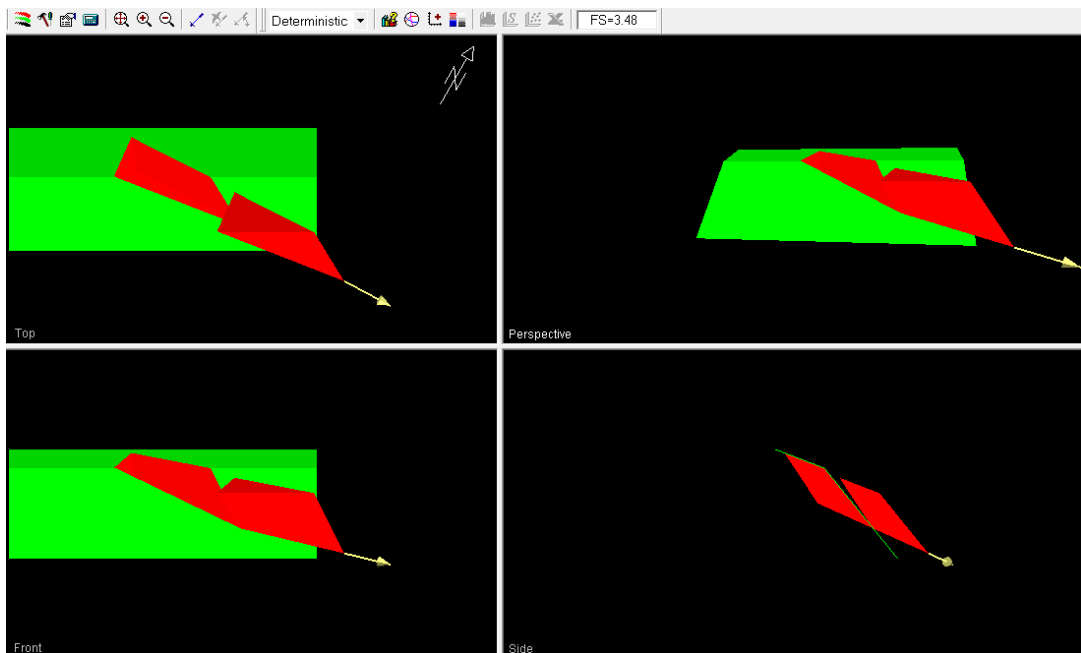
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 2 en condiciones sísmicas*



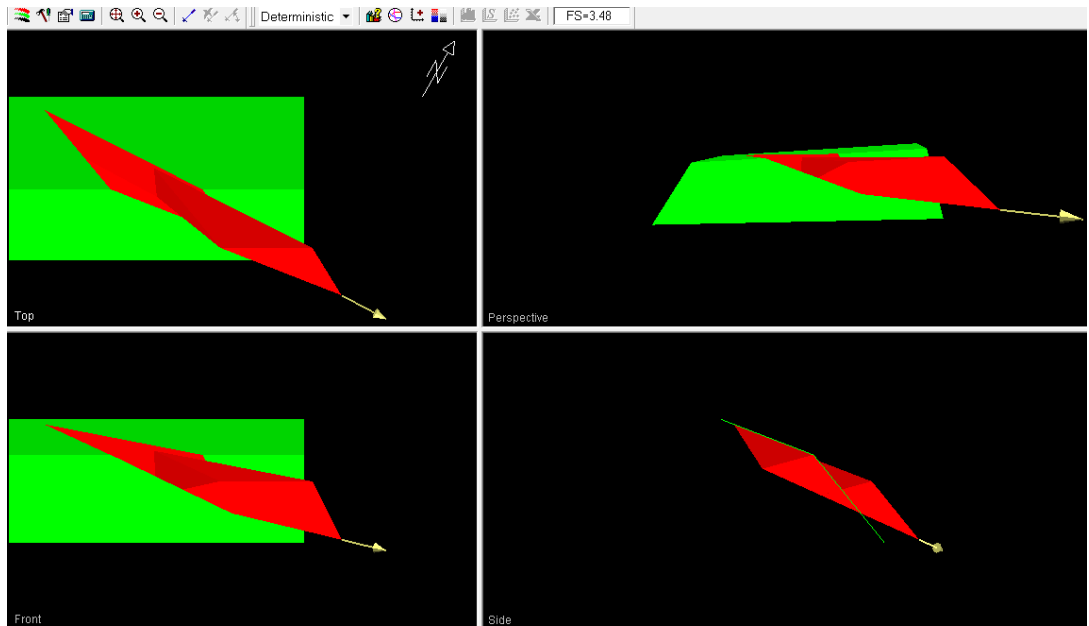
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 3 en condiciones sísmicas*



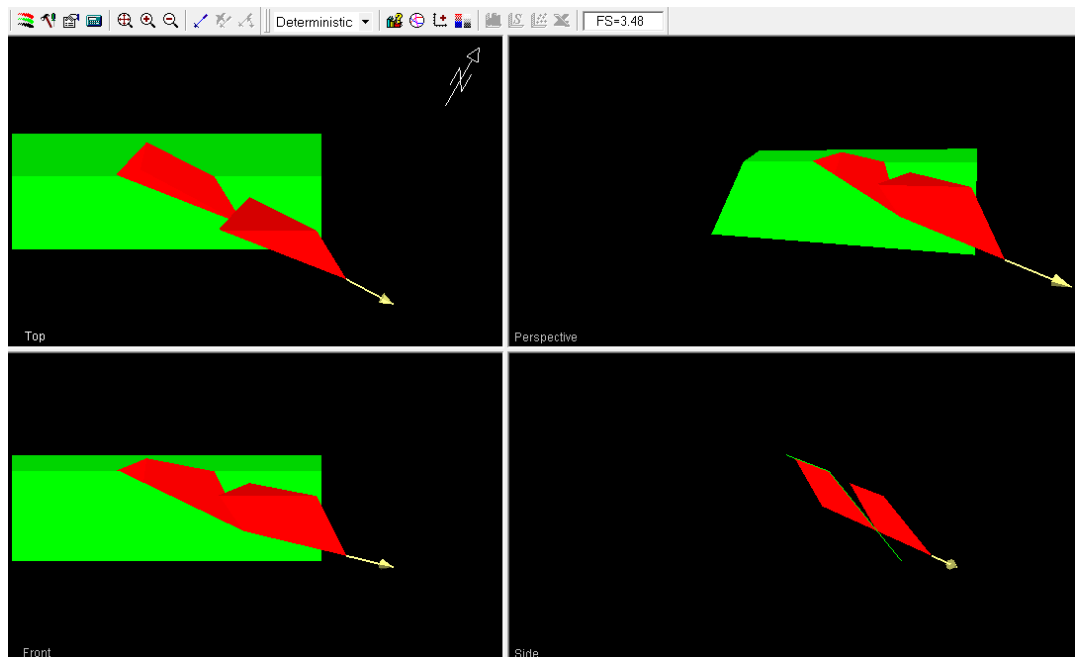
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 4 en condiciones sísmicas*



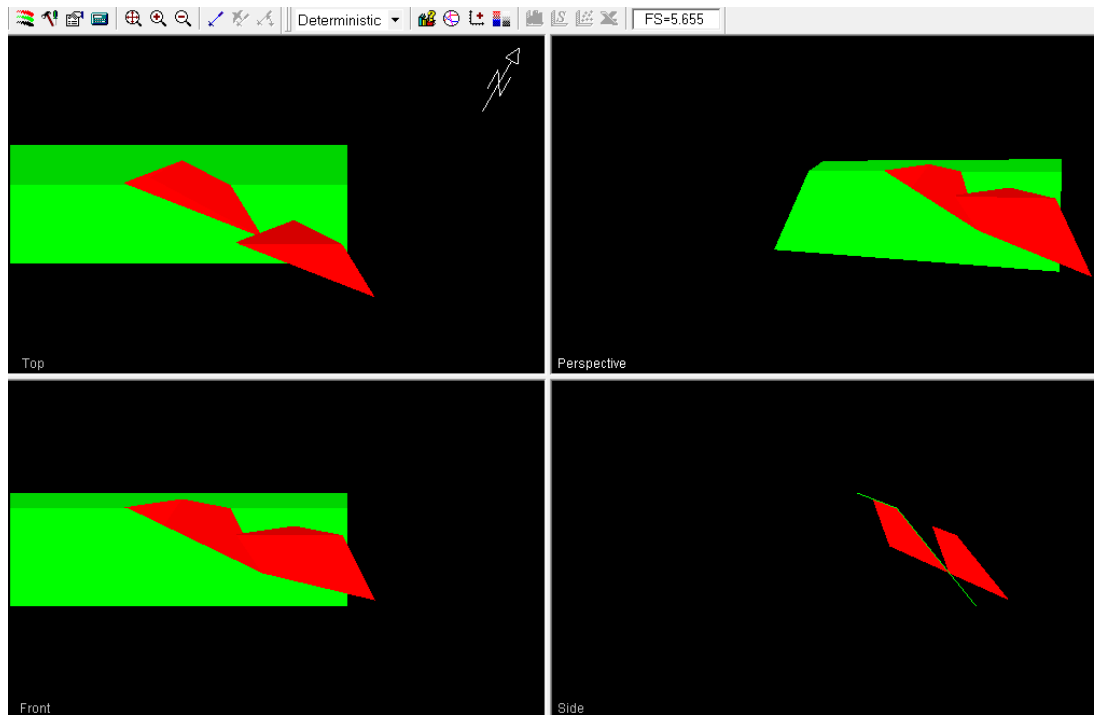
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 5 en condiciones sísmicas.*



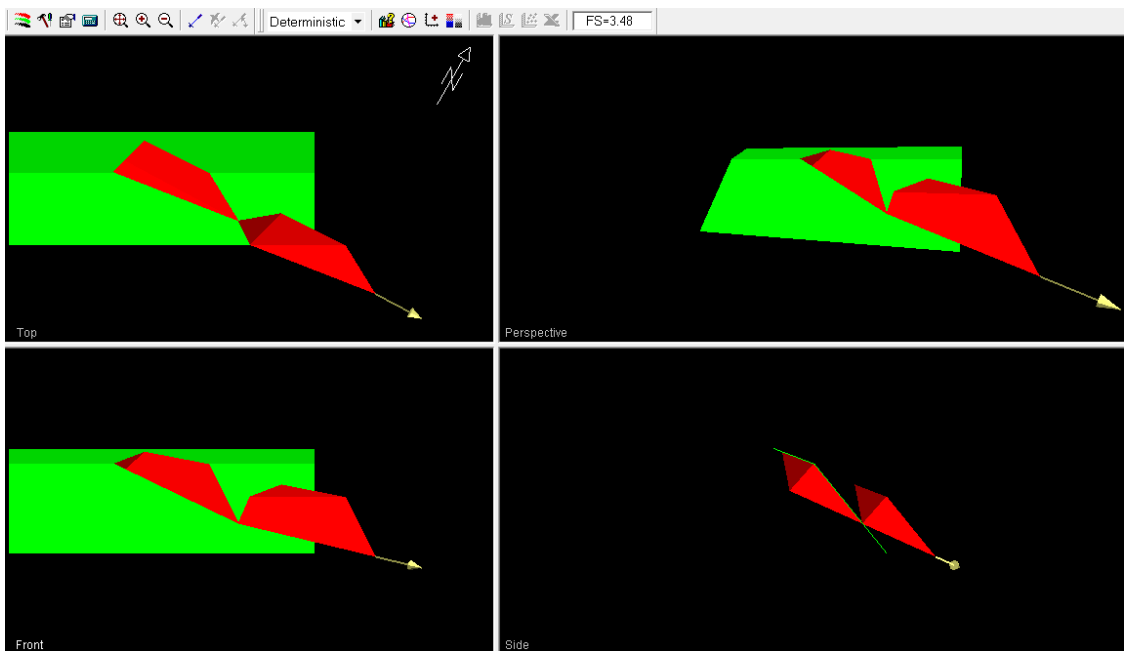
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 6 en condiciones sísmicas.*



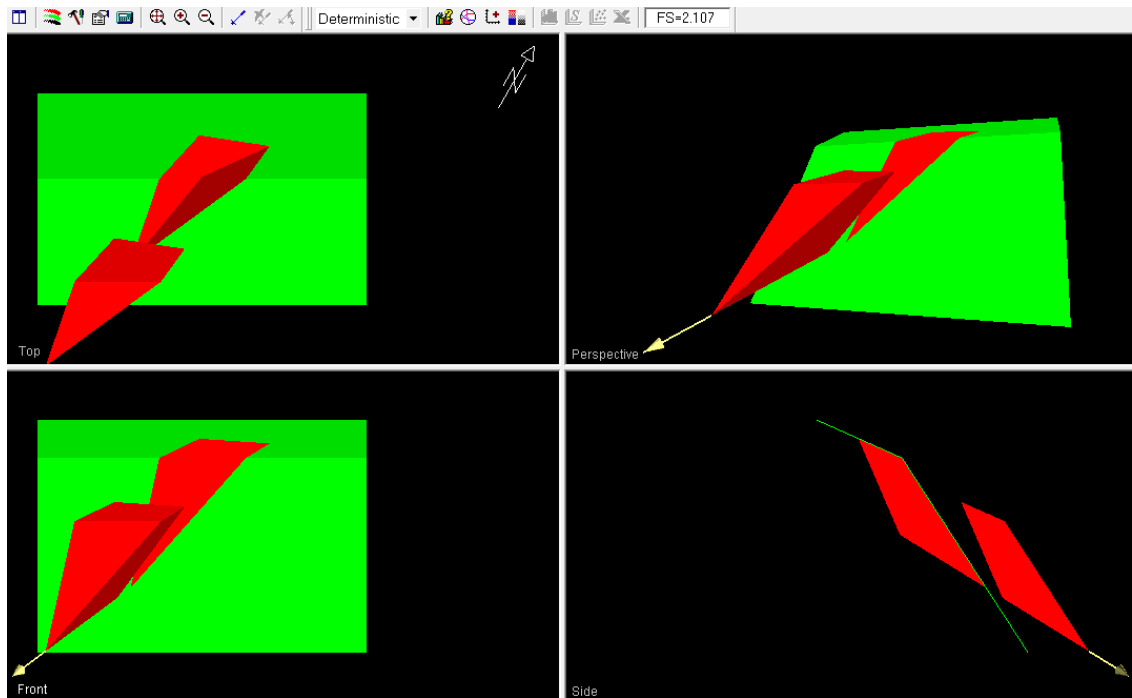
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 7 en condiciones sísmicas.*



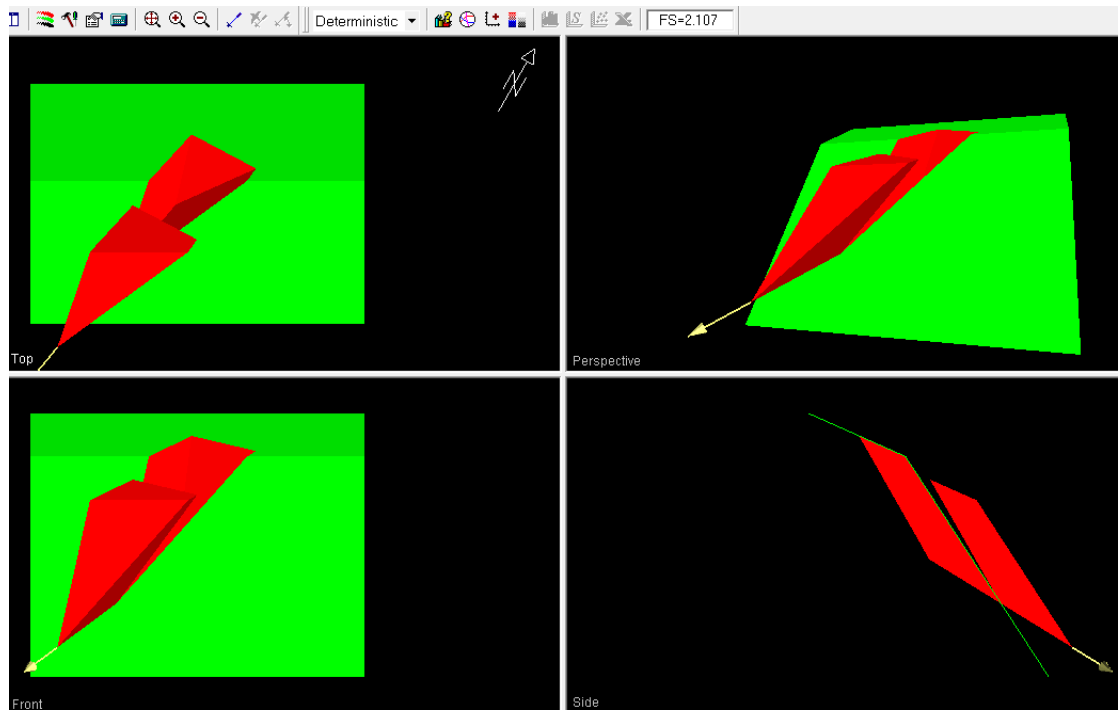
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 8 en condiciones sísmicas.*



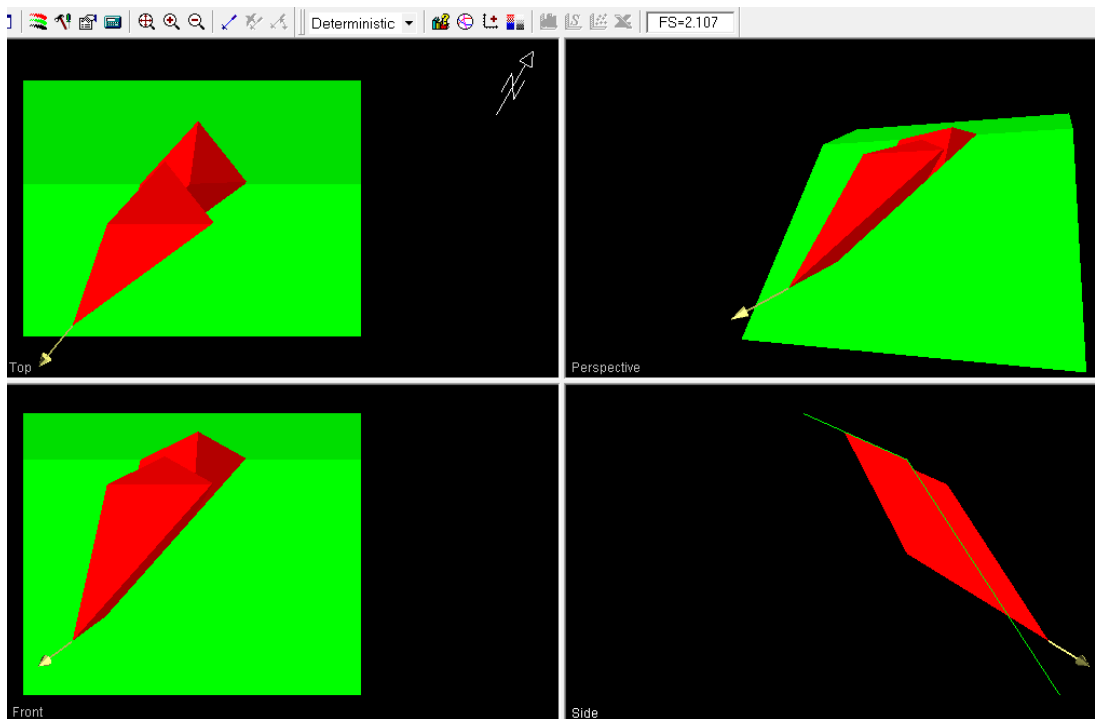
*Análisis de estabilidad de la Sección DE-Cuña 9 en condiciones sísmicas.*



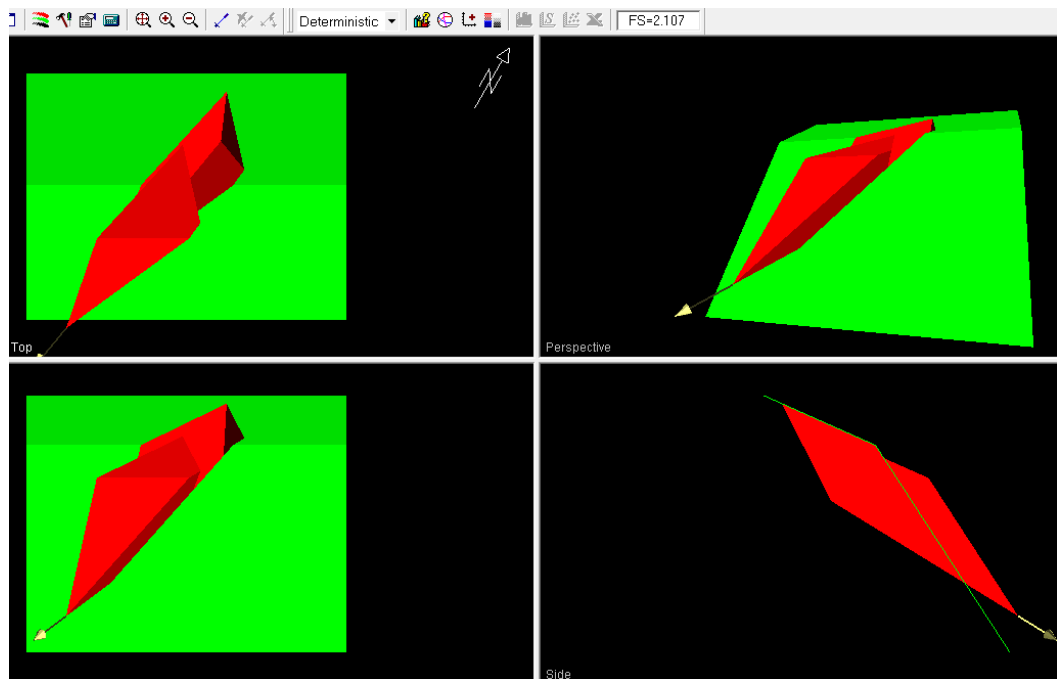
*Análisis de estabilidad de la Sección EF-Cuña 1 en condiciones sísmicas.*



*Análisis de estabilidad de la Sección EF-Cuña 2 en condiciones sísmicas.*



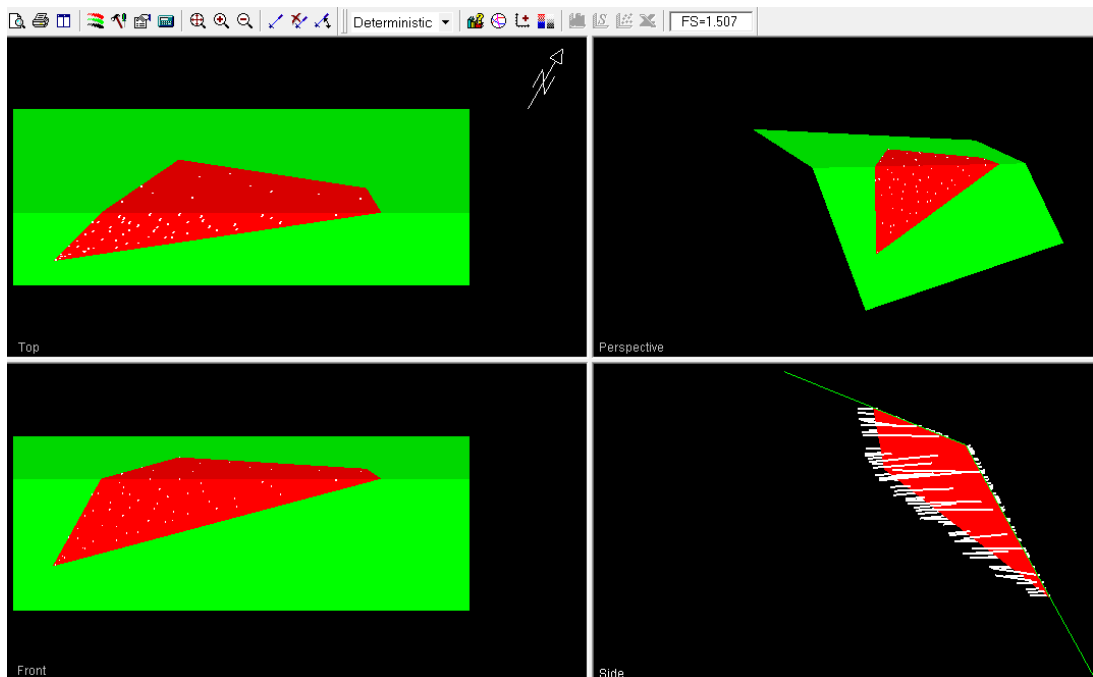
*Análisis de estabilidad de la Sección EF-Cuña 3 en condiciones sísmicas.*



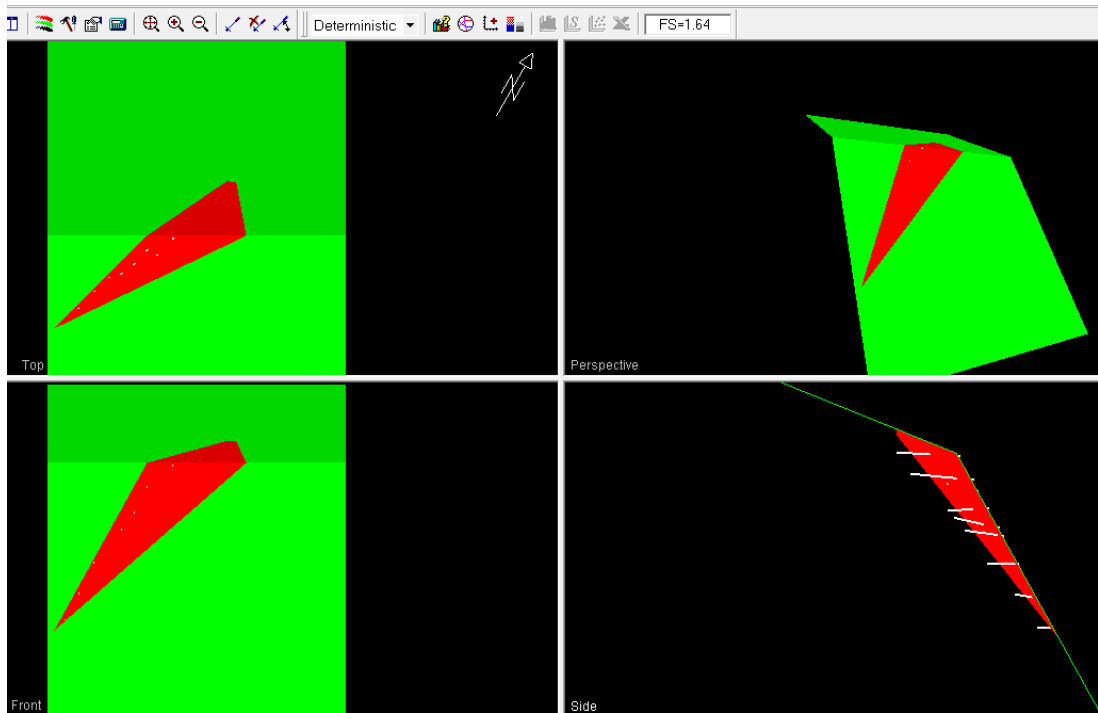
*Análisis de estabilidad de la Sección EF-Cuña 4 en condiciones sísmicas.*

## ANEXO G: ESTABILIZACIÓN DE CUÑAS CON PERNOS DE ANCLAJE CON EL SOFTWARE SWEDGE

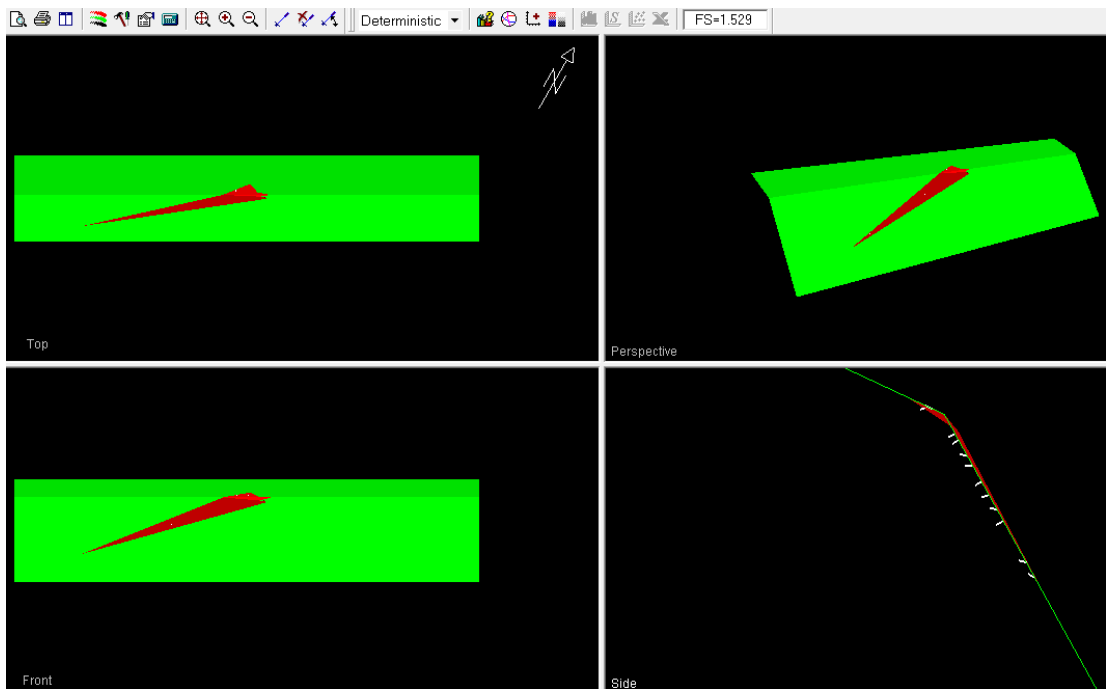
### PARTE 1: ESTABILIZACION CON PERNOS EN CONDICIONES NORMALES



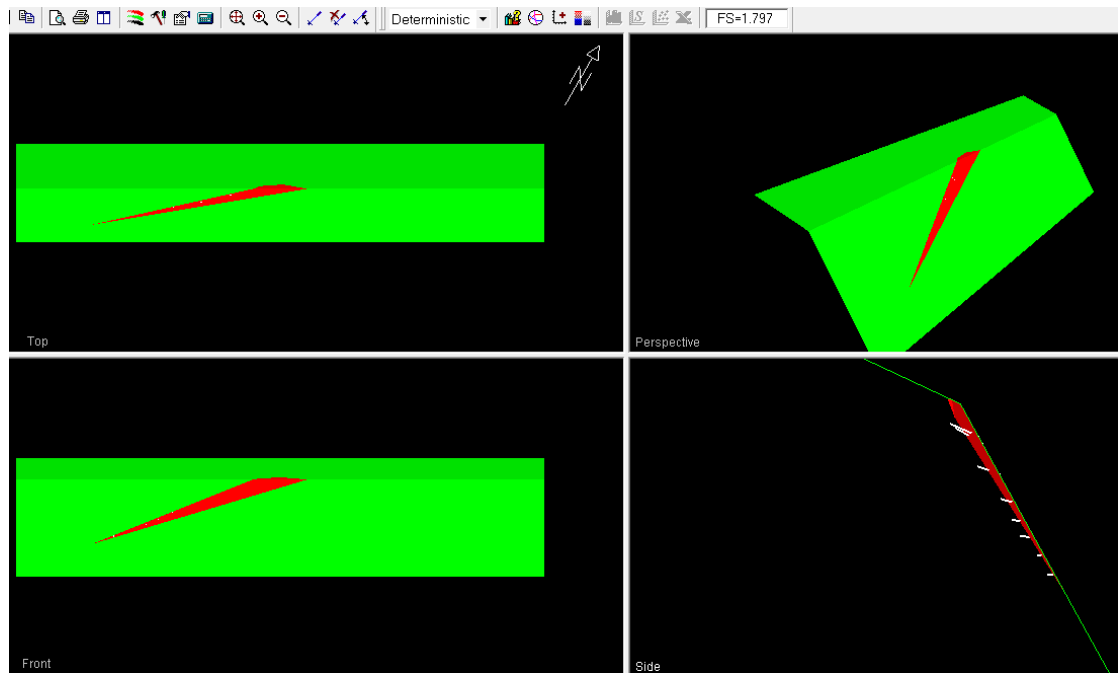
*Estabilidad de la Sección A-Cuña 1 en condiciones normales.*



*Estabilidad de la Sección A-Cuña 2 en condiciones normales.*



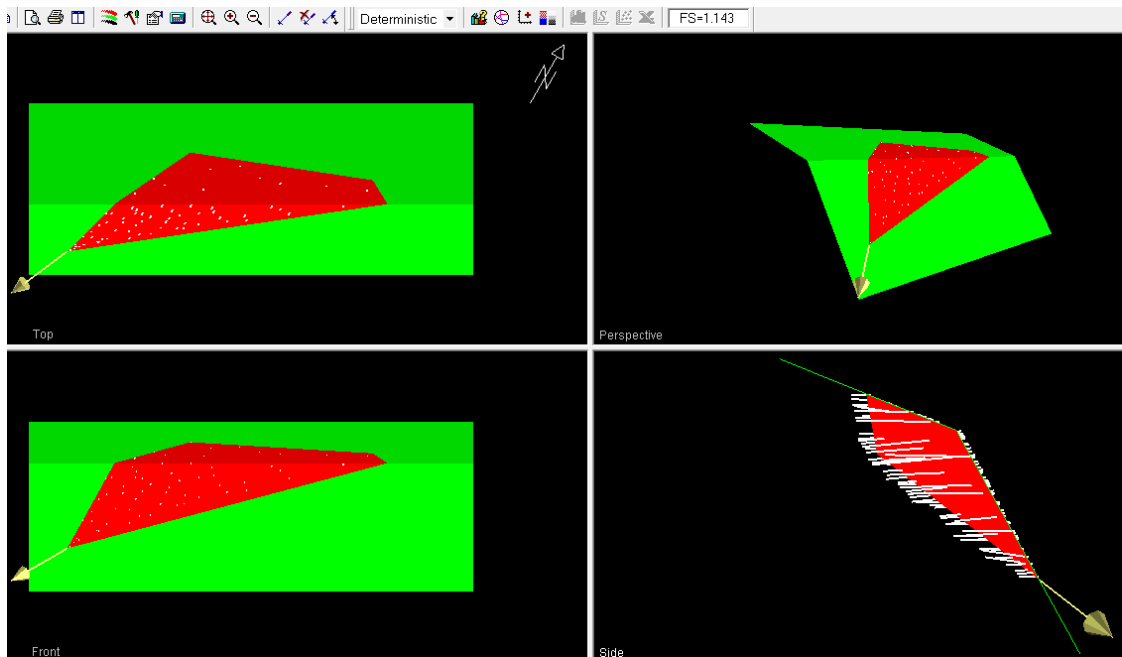
*Estabilidad de la Sección BC-Cuña 1 en condiciones normales.*



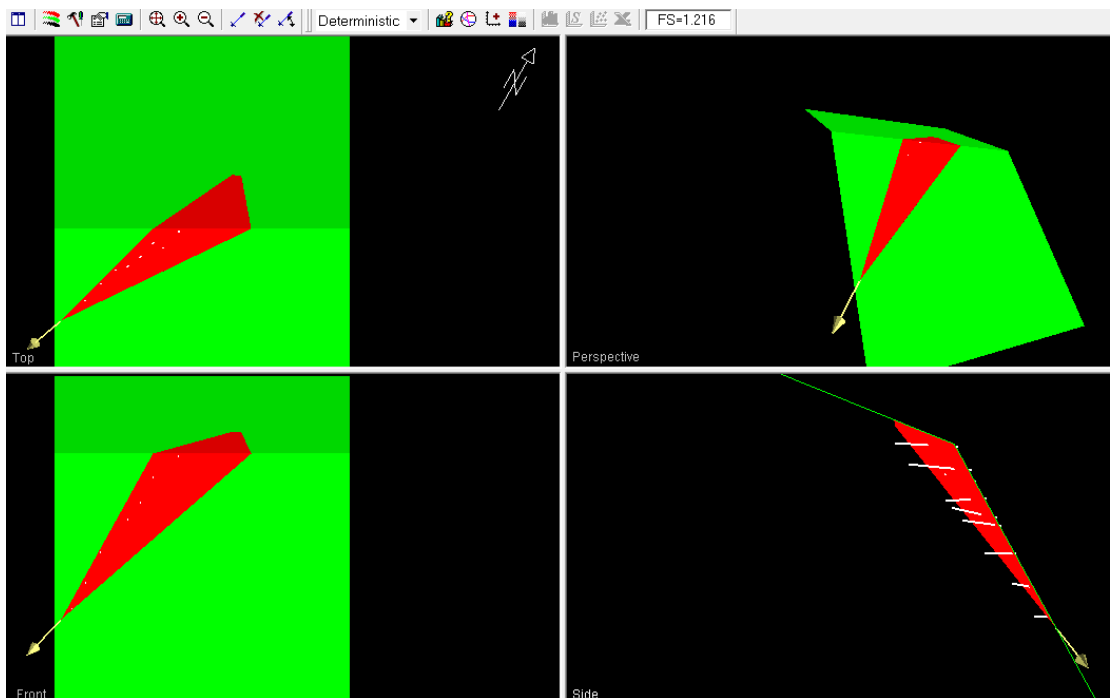
*Estabilidad de la Sección BC-Cuña 2 en condiciones normales.*

## ANEXO G

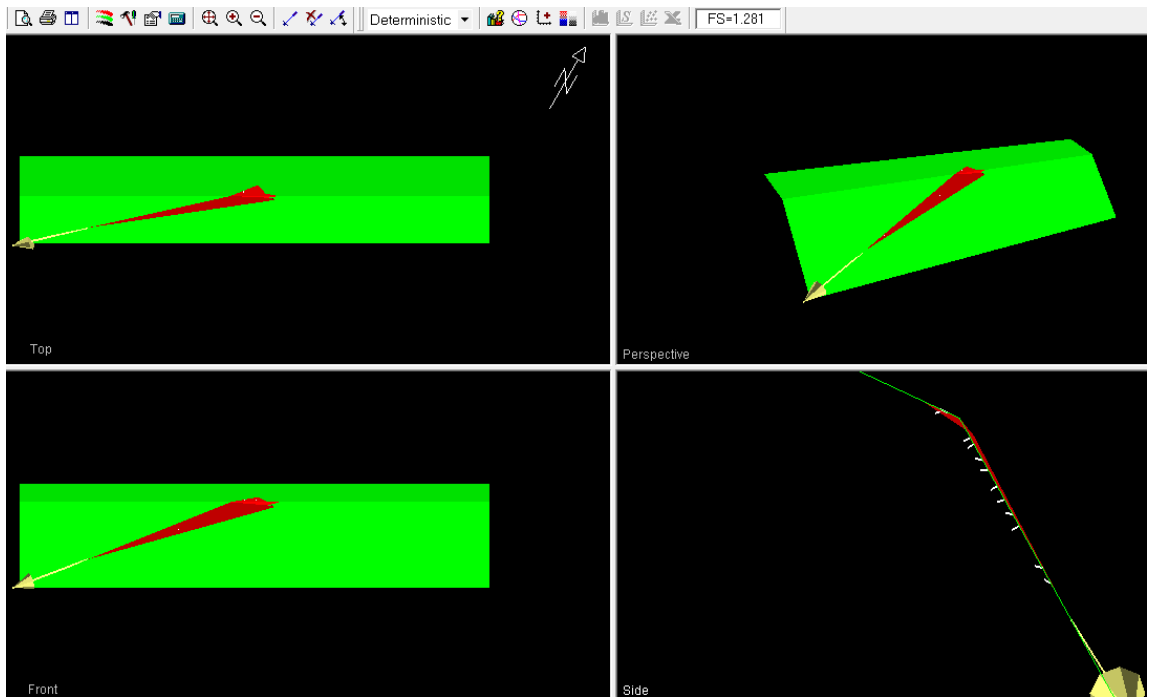
### PARTE 2: ESTABILIZACION DE LAS CUÑAS EN CONDICIONES SISMICAS



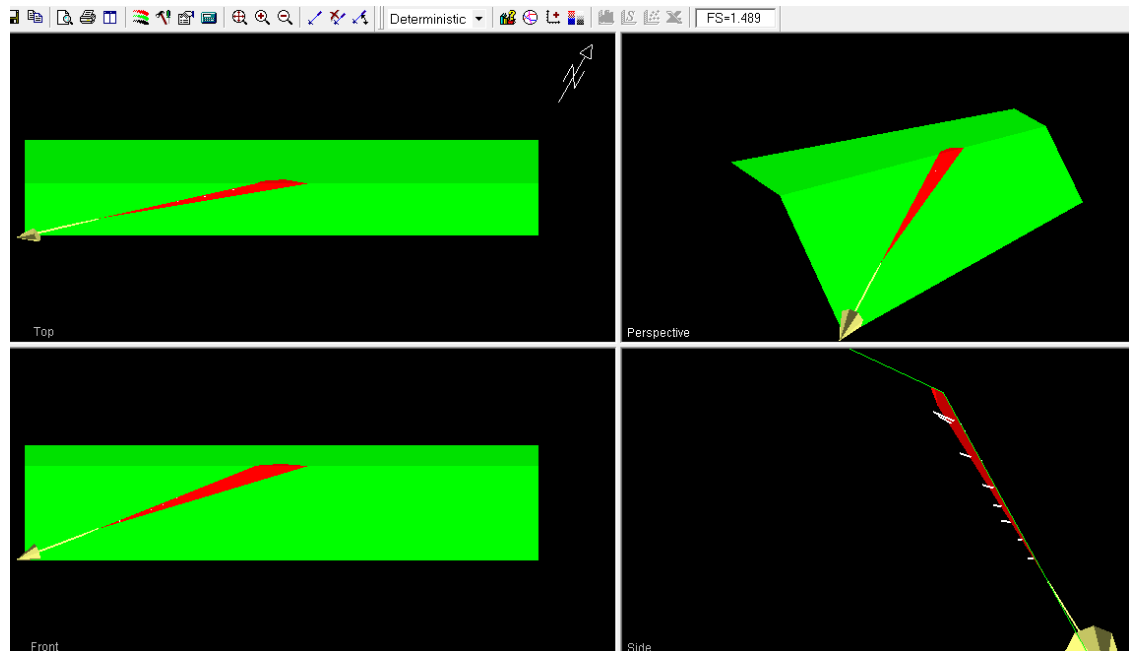
*Estabilidad de la Sección A-Cuña 1 en condiciones sísmicas.*



*Estabilidad de la Sección A-Cuña 2 en condiciones sísmicas.*



*Estabilidad de la Sección BC-Cuña 1 en condiciones sísmicas.*



*Estabilidad de la Sección BC-Cuña 2 en condiciones sísmicas.*