

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



**TESIS PROFESIONAL**

**APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS  
FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE  
LADERAS Y TALUDES  
SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA**

Para optar el título de:

**Ingeniero Geólogo**

Presentado Por:

**Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe**

Asesor:

**MCs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani**

**Cajamarca – Perú**

**2017**

## **AGRADECIMIENTO**

A mi alma mater la Universidad Nacional de Cajamarca, y en especial a los docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica por sus enseñanzas durante mi formación académica.

A mi asesor MCs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani, por su orientación y apoyo incondicional durante el desarrollo de esta investigación.

A mis padres, hermano y amigos por su apoyo en todo el proceso de esta investigación.

## **DEDICATORIA**

A todas las personas que no se dejan amilanar por las dificultades del camino, sino que las encaran y logran superarlas, como mi padre César Alcántara Julcamoro y mi madre Cruz Quispe Sangay, gracias a cuyo ejemplo y respeto he llegado a ser un profesional para bien de la sociedad.

## RESUMEN

Se analizaron las laderas y taludes del sector Calispuquio, al oeste de la ciudad de Cajamarca, constituidos por suelos y macizos rocosos de mala calidad, mediante las metodologías de Equilibrio Límite (Software Slide v7), Elementos Finitos (Software RS2 v9) y Diferencias Finitas (Software FLAC v8), en diversos escenarios, para estudiar y comparar sus resultados con la realidad y entre sí. Los resultados muestran que el software Slide v7 destaca por su velocidad de análisis y confiabilidad de los resultados en el análisis de laderas y taludes, aunque requiere entrenamiento para poder elegir los métodos de análisis adecuados (ya que cuenta con muchos y variados). El software RS2 v9 puede analizar taludes y laderas de forma rápida, pero se debe tener cuidado con el análisis de aguas subterráneas, ya que se generan factores de seguridad sub-estimados en relación con los otros dos softwares. El software FLAC v8 muestra resultados válidos en cualquier condición, pero requiere optimizaciones de geometría y grillas para que sean válidas, en su complemento FLAC SLOPE esta dificultad está ausente y se puede ingresar datos más rápido, pero solo acepta geometrías de taludes.

**Palabras Clave:** Taludes, laderas, Factor de seguridad, equilibrio límite, elementos finitos, diferencias finitas.

## **ABSTRACT**

The hillsides and slopes of Calispuquio sector, west of the Cajamarca's city, consisting of soil and rock masses low quality, were analyzed using methodologies of Limit Equilibrium (Software Slide v7), Finite Elements (Software RS2 v9) and Finite Differences (FLAC Software v8), in various scenarios, to study and compare their results with reality and with each other. The results show that the Slide v7 software stands out for its speed of analysis and reliability on its results analyzing hillsides and slopes, training is required to choose the appropriate analysis methods (as it has many and varied). The RS2 v9 software can analyze hillsides and slopes quickly, but care must be taken with groundwater, since sub-factors are generated in relation to the other two software. The FLAC v8 software displays valid results in any condition, but requires geometry and grid optimizations to be valid, in its complement, FLAC SLOPE, this difficulty is absent and data can be entered faster, but only accepts geometries of slopes.

**Keywords:** Hillside, slope, safety factor, limit equilibrium, finite elements, finite differences.

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>3</b>
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.2 BASES TEÓRICAS	4
2.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS	4
2.2.2 CRITERIOS DE ROTURA	6
2.2.3 MOVIMIENTOS EN MASA	11
2.2.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	12
2.2.5 MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE	14
2.2.6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	16
2.2.7 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS	18
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	19
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>20</b>
3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	20
3.2 ACCESIBILIDAD	20
3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	21
3.3.1 TIPO Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	21
3.3.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO	21
3.3.3 MUESTRA	21
3.3.4 UNIDAD DE ANÁLISIS	21
3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN	21

	<b>Pág.</b>
3.4.1 TÉCNICAS	21
3.4.2 INSTRUMENTOS Y MATERIALES	22
3.4.3 SOFTWARES	22
3.5 PROCEDIMIENTO Y TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	23
3.5.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	23
3.5.2 CARTOGRAFIADO TEMÁTICO	23
3.5.3 ANÁLISIS POR MEDIO DE TABLAS	23
3.6 ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	24
3.6.1 ANÁLISIS DE INESTABILIDAD LOS DESLIZAMIENTOS EXISTENTES	24
3.6.2 ANÁLISIS DE INESTABILIDAD	25
3.7 VARIABLES DE INESTABILIDAD	25
3.7.1 VARIBALES CONDICIONANTES	25
3.7.2 GEOMETRÍA DE LAS LADERAS Y TALUDES	32
3.7.3 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS	35
3.7.4 VARIABLES DESENCADENANTES	35
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>37</b>
4.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	37
4.1.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON LOS TRES SOFTWARES	37
4.1.2 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DEL SOFTWARE SLIDE	41
4.1.3 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO	42
4.1.4 ANÁLISIS CON DISEÑO ESTÁNDAR	44
4.2 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO	45
4.2.1 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON	45

	<b>Pág.</b>
4.2.1 RELACIÓN LINEAL DE LOS RESULTADOS	46
4.3 COMPARACIÓN DE LOS SOFTWARES ANALIZADOS	47
4.2 CONTRASTACIÓN CON LA HIPÓTESIS	48
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>49</b>
5.1 CONCLUSIONES	49
5.2 RECOMENDACIONES	50
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>51</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>55</b>
A. TABLAS DEL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK-BROWN	56
B. TABLAS DE REGISTRO EN CAMPO	63
C. PLANOS	65
D. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA	73
E. PERFILES	74
F. ANÁLISIS CON EL SOFTWARE ROCDATA V5	75
G. PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LAS UNIDADES INGENIERILES	81
H. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE SLIDE V7	85
I. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE RS2 V9	111
J. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE FLAC V8	133
<b>FIGURAS</b>	
Figura 1. Envolventes de Mohr-Coulomb en términos de esfuerzos tangenciales y normales (a) y esfuerzos principales (b) .....	6
Figura 2. Envolventes de rotura del criterio de Hoek-Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normales y tangencial (b). .....	7

Figura 3: Gráfico de las envolventes de rotura para el criterio de Hoek y Brown y del criterio de Mohr Coulomb. Apreciándose las gráficas de la resistencia uniaxial y global. ....	10
Figura 4. Diagrama de bloque de un deslizamiento.. .....	11
Figura 5. Métodos de análisis para movimientos en masa.. .....	12
Figura 6: Diagrama que muestra el tipo de modelo que se recomienda utilizar de acuerdo con la complejidad de los movimientos. ....	14
Figura 7. Varios estadios de un “análisis total de movimientos en masa” y las metodologías sugeridas. ....	14
Figura 8. Esquema de un sistema típico de análisis con tajadas o dovelas.. .....	15
Figura 9. Círculo de falla crítico según su factor de seguridad en Slide.. .....	15
Figura 10. Metodología de discretización del dominio en elementos finitos.. .....	17
Figura 11. Modelamiento de una falla en un talud con la metodología del SRF en RS2....	17
Figura 12. Metodología de discretización con diferencias finitas.. .....	18
Figura 13. Análisis del factor de seguridad con el Software FLAC.....	18
Figura 14. Metodología general del análisis de las laderas y taludes.....	24
Figura 15. Metodología del análisis de inestabilidad de los deslizamientos existentes. ....	24
Figura 16. Metodología del análisis de inestabilidad de las laderas y taludes críticos.....	25
Figura 17. Distribución del área de las pendientes en el área de estudio. ....	26
Figura 18. Distribución del área de las geoformas en el área de estudio. ....	26
Figura 19. Distribución del área de las unidades lito-estratigráficas en el área de estudio. ....	27
Figura 20. Distribución del área de los acuíferos en el área de estudio. ....	32
Figura 21. Distribución del área de las zonas de cobertura vegetal en el área de estudio... ..	32
Figura 22. Ubicación de los perfiles de análisis en la zona de estudio en Google Earth. ...	33
Figura 23. Coincidencias y discrepancias de los resultados con intervalos tradicionales... ..	39
Figura 24. Variaciones en los factores de seguridad encontrados. ....	40
Figura 25. Coincidencias y discrepancias de los resultados en el límite de estabilidad.....	41
Figura 26. Matriz de Pearson para los datos de la Figura 23 a una precisión de 0.001 (a) y 0.01 (b). ....	45
Figura 27. Relación Lineal de los FS obtenidos: Slide v7-RS2 (a), Slide v7-FLAC (b), RS2-FLAC v8 (c) y gráfico 3D de los FS obtenidos.....	46

## **FOTOS**

**Pág.**

Foto 1. Areniscas cuarzosas de la Formación Farrat al sur de la zona de estudio.....	28
Foto 2. Lutitas ferruginosas intercaladas con limolitas pertenecientes a la Formación Inca cerca al deslizamiento sur.....	28
Foto 3. Calizas wackestone intercaladas con lutitas de la Formación Chúlec al sur de la zona de estudio.....	29
Foto 4. Flujos piroclásticos de pómez y cenizas de la Formación Porculla en la zona central del área de estudio. ....	29
Foto 5. Depósito aluvial con gravas y arcillas de alta plasticidad en las riveras de la quebrada Calispuquio.....	30
Foto 6. Cuaternario Coluvial de gravas y arcillas producto del deslizamiento en el cerro Layzón. ....	30
Foto 7. Depósito Cuaternario Deluvial de limos y arcillas cubriendo al cerro Antenas. ....	31
Foto 8. Cono coluvio-aluvial en el cerro Antenas en suelos arcillosos de baja plasticidad.	31
Foto 9. Detalle de la ubicación de los perfiles: a) A-A', vista hacia el SW; b) B-B,' vista hacia el NW; c) C-C', vista hacia el S; d) D-D', vista hacia el NE.....	34

## **TABLAS**

Tabla 1. Clasificación de los suelos por el sistema SUCS .....	4
Tabla 2. El sistema RQD.....	5
Tabla 3. Parámetros de la Clasificación Geomecánica RMR <sub>89</sub> .....	5
Tabla 4. Clasificación de los macizos rocosos según el RMR <sub>89</sub> .....	5
Tabla 5. Clasificación de los movimientos de masa.....	11
Tabla 6. Características de las metodologías utilizadas en la modelación de movimientos en masa.....	13
Tabla 7. Características de las principales metodologías de equilibrio límite de dovelas...	16
Tabla 8. Coordenadas UTM-WGS84 de los vértices de la zona de estudio.....	20
Tabla 9. Rutas de acceso a la zona de estudio. ....	21
Tabla 10. Extensión superficial de las unidades de pendientes cartografiadas en el área de estudio.....	25
Tabla 11. Extensión superficial de las geoformas cartografiadas en el área de estudio.....	26

Tabla 12. Extensión superficial de las unidades lito-estratigráficas cartografiadas en el área de estudio.....	27
Tabla 13. Extensión superficial de los acuíferos cartografiados en el área de estudio.....	31
Tabla 14. Extensión superficial de las zonas de cobertura vegetal cartografiadas en el área de estudio.....	32
Tabla 15. Ubicación de los perfiles diseñados para el análisis.....	33
Tabla 16. Características de los perfiles diseñados para el análisis.....	33
Tabla 17. Características y ubicación de las estaciones geomecánicas para cada unidad geotécnica. ....	35
Tabla 18. Condiciones desencadenantes en los utilizados en los análisis. ....	36
Tabla 19. Resultados del análisis de seguridad global (mismas condiciones para todos los softwares). ....	38
Tabla 20. Comparación de los resultados del análisis de perfil A-A'1 con el software Slide v7 bajo sus métodos de superficies de falla y de dovelas. Sombreado los valores con mayor coincidencia en cada secuencia. ....	42
Tabla 21. Resultados del análisis probabilístico con el software Slide v7 sobre el perfil C-C'2. ....	43
Tabla 22. Resultados del análisis probabilístico con el software RS2 v9 sobre el perfil C-C'2. ....	43
Tabla 23. Resultados del análisis probabilístico con el software FLAC SLOPE v8 sobre el perfil C-C'2. ....	44
Tabla 24. Conclusión del análisis probabilístico con los tres softwares comparados. ....	44
Tabla 25. Comparación de resultados con condiciones de sismicidad máxima normal y con Eurocode 7 en el perfil C-C'2 con el software Slide v7.....	44
Tabla 26. Comparación de las características analizadas de los softwares. ....	47
Tabla 27. Otras características comparativas entre los softwares analizados.....	48

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

El sector Calispuquio, se encuentra al oeste de la ciudad de Cajamarca, y muestra señales de inestabilidad en las laderas y taludes, que podría afectar a la población de la ciudad de Cajamarca. Los materiales geológicos en el sector Calispuquio son suelos, y macizos rocosos de las formaciones Farrat, Inca, Chúlec y del volcánico San Pablo, que condicionan su inestabilidad sumadas a factores desencadenantes de sismicidad y precipitaciones intensas. En este contexto se aplicaron los métodos de Equilibrio Límite, Elementos Finitos y Diferencias Finitas para calcular los factores de seguridad que ayuden a conocer la inestabilidad real del Sector Calispuquio.

La investigación se centró en resolver la pregunta ¿Cuál es el comportamiento geomecánico de las laderas y taludes del Sector Calispuquio con los métodos de Equilibrio Límite, Elementos Finitos y Diferencias Finitas?, teniendo como hipótesis de que cada método de análisis tiene ventajas y desventajas, teniendo que realizar una buena caracterización geomecánica antes de elegir el más indicado.

El sector Calispuquio es un punto de fuerte expansión urbana y no cuenta con estudios de estabilidad que ayuden a los gobiernos locales y a la población en general a planificarse antes de construir sus nuevos asentamientos y para implementar medidas de mitigación en los lugares con alta inestabilidad pero que ya se encuentren habitados. Se utilizó modernos softwares de Equilibrio límite, Elementos Finitos y Diferencias finitas, ya que la complejidad de los materiales geológicos que se encuentren en la zona dificulta su análisis.

El alcance espacial de la investigación fue el sector Calispuquio, al oeste de la ciudad de Cajamarca, teniendo una duración de 9 meses (enero, 2016 - septiembre, 2016); y

centrándose en la aplicación de los métodos de Equilibrio límite, Elementos finitos y Diferencias finitas en el comportamiento de laderas y taludes del Sector Calispuquio. Se tuvo la limitación de que las pruebas de resistencia en laboratorio son costosas y fueron remplazadas por pruebas de resistencia en campo.

El objetivo general fue “Aplicar los métodos de Equilibrio Límite, Elementos Finitos y Diferencias Finitas en las laderas y taludes del Sector Calispuquio”, siendo los objetivos específicos los de: Estudiar la geología y geomecánica del sector Calispuquio, aplicar el método de Equilibrio Límite con el software Slide v7, aplicar el método de Elementos Finitos con el software Phase2 (RS2 v9), aplicar el método de Diferencias Finitas con el software FLAC v8, y comparar los resultados obtenidos de los métodos utilizados.

El contenido de los siguientes capítulos se describe a continuación.

**CAPÍTULO II:** Contiene los antecedentes teóricos de la investigación, las bases teóricas sobre materiales geológicos, criterios de rotura, movimientos en masa, análisis de estabilidad, y los métodos de análisis que se utilizarán en la investigación (método de equilibrio límite, elementos finitos y diferencias finitas); y la definición de términos.

**CAPÍTULO III:** Constituido por la descripción de los materiales y métodos que se utilizarán en la investigación, generalidades, además de las variables condicionantes y desencadenantes de inestabilidad.

**CAPÍTULO IV:** Se presentan los resultados a los que he llegado al final de la investigación, análisis estadístico y la contrastación con la hipótesis planteada.

**CAPÍTULO V:** Muestra las conclusiones para cada objetivo que se ha planteado además de las recomendaciones para futuras investigaciones además de medidas inmediatas que podrían aplicar las autoridades locales para mitigar desastres naturales en la zona.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Bobet (2010) estudió los métodos numéricos en geotecnia, dando énfasis a los métodos discontinuos para predecir el comportamiento del macizo rocoso.

Huaripata (2014) Realizó un modelo geodinámico de la quebrada Cruz Blanca utilizando el enfoque de cuenca para el análisis de sus variables.

Jing (2003) Estudió la mayor parte de los métodos numéricos existentes, realizando una exhaustiva explicación de cada uno y como utilizarlos.

Navarro (2007) Realizó para el INGEMMET el Mapa geológico de Cuadrángulo 15f a escala 1:50 000, clasificando los eventos eruptivos según su centro volcánico.

Ramirez & Alejano (2004) compararon los métodos de elementos finitos, diferencias finitas, elementos de contorno y elementos discretos.

Reyes (1980) Realizó para el INGEMMET el estudio geológico de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba, hojas 15-f, 15-g y 16-g, estudió la estratigrafía y la geología estructural a escala 1:100 000.

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

## 2.2 BASES TEÓRICAS

### 2.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS

#### 2.2.1.1 Clasificación de los suelos (SUCS)

Es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo (Wikipedia, 2016).

Tabla 1. Clasificación de los suelos por el sistema SUCS, primeras letras: G-grava, S-arena, M-limo, C-arcilla, O-orgánico; segundas letras P: pobremente graduado (tamaño de partícula uniforme), W: bien graduado (tamaños de partículas diversos), H: alta plasticidad, L: baja plasticidad. Fuente: (Wikipedia.org, 2016a).

Divisiones mayores		Símbolo del grupo	Nombres típicos		
Suelos granulares gruesos más del 50% retenido en el tamiz n°200 (0.075 mm)	Grava > 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz n°4 (4.75 mm)	grava limpia menos del 5% pasa el tamiz n°200	GW Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		
			GP Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		
		grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200	GM Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		
			GC Gravas arcillosas, mezcla grava-arena-arcilla.		
	Arena ≥ 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz n°4	Arena limpia		SW Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	
				SP Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	
		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200		SM Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	
				SC Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	
			limos y arcillas límite líquido < 50	inorgánico	ML Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.
				orgánico	OL Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas. Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.
limo y arcilla límite líquido ≥ 50	inorgánico	MH Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.			
		CH Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.			
	orgánico	OH Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.			
Suelos altamente orgánicos		Pt	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.		

### 2.2.1.2 Clasificación de los Macizos Rocosos

Geomecánicamente, se pueden utilizar sistemas como el RQD (Deere, 1963, 1967), RMR (Bieniawski, 1989), y, que en base a valoraciones de diversos factores del macizo rocoso, los dividen según su calidad ingenieril.

Tabla 2. El sistema RQD.

RQD	Clasificación	Procedimientos generales
<25	Muy pobre	1. Se relaciona las muestras de roca mayores a 10cm y se relaciona con la longitud total (D. Deere, 1963):
25-50	Pobre	Ecuación 1. $RQD = \frac{\text{Muestras de roca} > 10\text{cm}}{\text{Longitud total (m)}} * 100$
50-75	Regular	2. Se relaciona el número de discontinuidades por metro ( $\lambda$ ) según la siguiente fórmula (Priest & Hudson, 1976):
75-90	Bueno	Ecuación 2. $RQD = 100e^{-0.1\lambda} * (0.1\lambda + 1)$
90-100	Muy Bueno	Dónde: $\lambda$ = Número de discontinuidade/Longitu (m)

Tabla 3. Parámetros de la Clasificación Geomecánica RMR<sub>89</sub>. (Bieniawski, 1989)

1. Resistencia de la roca intacta	Resistencia a la compresión Puntual (MPa) "RCP"	>10	4-10	2-4	1-2	Para estos rangos es recomendable ensayos de RCU		
	Resistencia a la compresión Uniaxial (MPa) "RCU"	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Valor	15	12	7	4	2	1	0
2. RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25			
Valor	20	17	13	8	3			
3. Espaciam. de las discont. (m)	>2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06			
Valor	20	15	10	8	5			
4. Condición de las discont.	Longitud (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20		
	Valor	6	4	2	1	0		
	Separación (mm)	Ninguna	<0.1	0.1-1	1-5	>5		
	Valor	6	5	4	1	0		
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Algo rugosa	Suave	Pulida		
	Valor	6	5	3	1	0		
5. Agua subterránea	Relleno (mm)	Ninguno	<5 duro	>5 duro	<5 blando	>5 blando		
	Valor	6	4	2	2	0		
5. Agua subterránea	Alteración	Ninguna	Ligera	Moderada	Elevada	Descomp.		
	Valor	6	5	3	1	0		
5. Agua subterránea	Seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo			
Valor	15	10	7	4	0			

Tabla 4. Clasificación de los macizos rocosos según el RMR<sub>89</sub>. (Bieniawski, 1989)

RMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Clasificación	Muy pobre	Pobre	Regular	Bueno	Muy bueno

## 2.2.2 CRITERIOS DE ROTURA

### 2.2.2.1 El criterio de rotura de Mohr Coulomb

La teoría de Mohr-Coulomb es un modelo matemático que describe la respuesta de materiales quebradizos, tales como hormigón, o agregados de partículas como el suelo, a esfuerzo cortante, así como tensión normal. La mayoría de los materiales en ingeniería clásica se comportan siguiendo esta teoría al menos en una parte del corte. En general, la teoría se aplica a los materiales para los que la resistencia a la compresión es muy superior a la resistencia a la tracción, caso de los materiales cerámicos. La teoría explica que el corte de un material se produce para una combinación entre tensión normal y tensión tangencial, y que cuanto mayor sea la tensión normal, mayor será la tensión tangencial necesaria para cortar el material. (Wikipedia, 2016).

La relación de esa envolvente se expresa como.

Ecuación 3. 
$$\tau = \sigma \tan \phi + c$$

Donde:

- ✓  $\tau$  es el esfuerzo cortante.
- ✓  $\sigma$  es la tensión de normal.
- ✓  $c$  es la intersección de la línea de fallo con el eje de  $\tau$ , llamada cohesión.
- ✓  $\phi$  es la pendiente del ángulo de la envolvente, también llamado el ángulo de rozamiento interno.

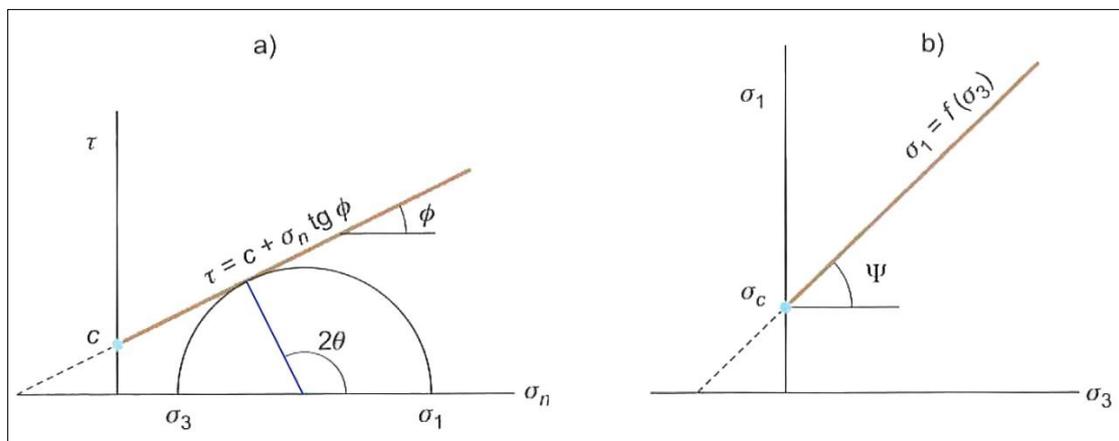


Figura 1. Envolventes de Mohr-Coulomb en términos de esfuerzos tangenciales y normales (a) y esfuerzos principales (b). Para un estado tensional situado por debajo de las rectas o envolventes no se producirá rotura. (González et al , 2003)

### 2.2.2.2 El criterio de rotura de Hoek-Brown

El criterio de rotura de Hoek-Brown es ampliamente aceptado y ha sido aplicado en de proyectos a nivel mundial, sólo debe aplicarse a los macizos rocosos donde la estructura analizada es grande y los bloques son pequeños en comparación y en los que hay un número suficiente de discontinuidades muy próximas entre sí, con características superficiales similares, para asumir al comportamiento de fractura como isotrópico (Anexo A.1). Se define por (Hoek, Carranza-Torres, & Corkum, 2002):

Ecuación 4: 
$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

- $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$  son el máximo y mínimo esfuerzo principal efectivo en la fractura
- $m_b$  es el valor de la constante m de Hoek y Brown para el macizo rocoso
- $s$  y  $a$  son las constantes que dependen de las características del macizo rocoso y
- $\sigma_{ci}$  es el esfuerzo de compresión uniaxial para las piezas de roca intacta

Los esfuerzos normal y de cizalla están relacionados a los esfuerzos principales por la siguiente ecuación (Hoek et al., 2002):

Ecuación 5: 
$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} * \frac{d\sigma'_1/d\sigma'_3 - 1}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1}$$

Ecuación 6: 
$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{d\sigma'_1/d\sigma'_3}}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1}$$

Ecuación 7: 
$$d\sigma'_1/d\sigma'_3 = 1 + am_b(m_b\sigma'_3/\sigma'_{ci} + s)^{a-1}$$

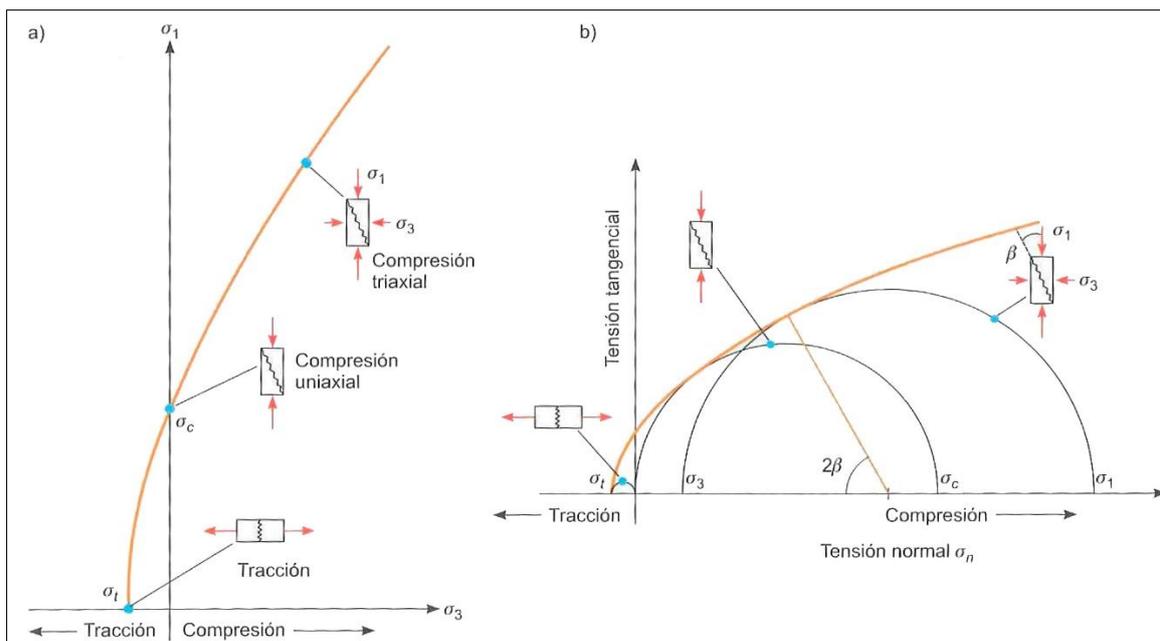


Figura 2. Envolturas de rotura del criterio de Hoek-Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normales y tangencial (b). Representación de las diferentes condiciones de (González et al., 2003)

### ***Propiedades de la Roca Intacta***

La relación entre los esfuerzos principales de rotura de una roca se define por dos constantes, la resistencia a la compresión uniaxial  $\sigma_{ci}$  y una constante  $m_i$ . Siempre que sea posible los valores de estas constantes deben ser determinados por análisis estadístico de resultados de ensayos triaxiales. Cuando las pruebas de laboratorio no son posibles, Las tablas de los Anexos A.2 y A.3, pueden utilizarse para obtener estimaciones de  $\sigma_{ci}$  y  $m_i$ .

### ***El Índice de Resistencia Geológica GSI***

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

La tabla del Anexo A.4 es utilizada para calcular el GSI para macizos homogéneos y la tabla del Anexo A.5 para heterogéneos.

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

*Ecuación 8:* 
$$GSI = 1.5JCond_{89} + RQD/2$$

### ***El Factor de Disturbación D***

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

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

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

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

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

## ***La Resistencia a la compresión uniaxial y tensional del macizo rocoso***

La resistencia a la compresión uniaxial y tensional del macizo rocoso se obtiene mediante la suposición de  $\sigma'_3 = 0$  en la Ecuación 4, dando como resultado:

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

$$\text{Ecuación 13:} \quad \sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{mb}$$

La Ecuación 13 se obtiene suponiendo  $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma'_t$  en la Ecuación 4. Esto representa una condición de tensión biaxial (Hoek, 1983).

## ***Los Parámetros de Mohr-Coulomb***

El proceso de ajuste implica equilibrar las áreas en la gráfica de Mohr-Coulomb, resultando:

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

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

Cuando  $\sigma_{3n} = \sigma'_{3max}/\sigma_{ci}$

La resistencia cizallante de Mohr-Coulomb  $\tau$ , para una tensión normal  $\sigma$  dada, se encuentra por sustitución de valores de  $c'$  y  $\phi'$  en la ecuación:

$$\text{Ecuación 16:} \quad \tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

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

$$\text{Ecuación 17:} \quad \sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma'_3$$

El valor de  $\sigma'_{3max}$  para su uso en la Ecuación 14 y Ecuación 15, para túneles (Ecuación 18), taludes (Ecuación 19) y para casos generales (Ecuación 20) es:

$$\text{Ecuación 18:} \quad \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94}$$

$$\text{Ecuación 19:} \quad \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$$

$$\text{Ecuación 20:} \quad \sigma'_{3max} = \frac{\sigma'_{ci}}{4}$$

Dónde:  $\gamma$  es el peso específico de la roca intacta y  $H$  es la profundidad del túnel o altura del talud. La Ecuación 20 está basada en la observación empírica que el rango de tensiones asociado con la fractura frágil ocurre cuando  $\sigma'_{3max}$  es menor a un cuarto de  $\sigma'_{ci}$ .

## Resistencia Global del Macizo Rocosó

El fallamiento inicia cuando  $\sigma_c$  (resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso Ecuación 12.) es superada por la tensión inducida y se propaga un campo de tensión biaxial hasta estabilizarse cuando la fuerza local, Ecuación 4, es mayor que las tensiones  $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$  inducidas. Sin embargo, en ocasiones es útil considerar el comportamiento “global” de un macizo rocoso en lugar de detallar este proceso de fallamiento (Hoek, 2005):

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

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

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

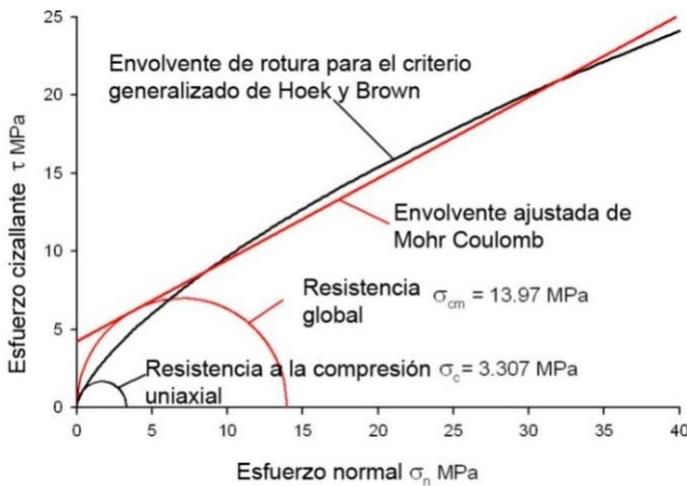


Figura 3: Gráfico de las envolventes de rotura para el criterio de Hoek y Brown y del criterio de Mohr Coulomb. Apreciándose las gráficas de la resistencia uniaxial y global. (Hoek, 2005).

## El Módulo de Deformación

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

Ecuación 23: 
$$E_{rm} (MPa) = 100\,000 \left( \frac{1-D/2}{1+e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right)$$

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

Ecuación 24:

$$E_i = MR * \sigma_{ci}$$

Ecuación 25:

$$E_{rm} = E_i \left( 0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

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

### 2.2.3 MOVIMIENTOS EN MASA

Son aquellos movimientos de materiales geológicos (rocas, detritos o suelos) en taludes o laderas debidos a la gravedad, la incidencia de su estudio recae en que pueden afectar a poblaciones por su gran incertidumbre de incidencia tanto en lugar como en tiempo.

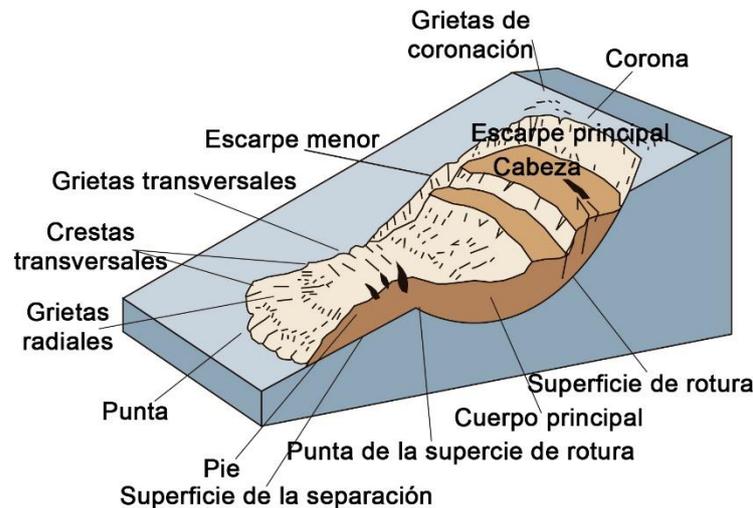


Figura 4. Diagrama de bloque de un deslizamiento (Highland & Jhonson, 2004)

Según la clasificación de movimientos de masa del Grupo de Estándares para Movimientos en Masa de Highland & Jhonson (2004) y GEMMA (2007) tenemos:

Tabla 5. Clasificación de los movimientos de masa Highland & Jhonson (2004) y GEMMA (2007).

TIPO	SUBTIPO
Caídas	Caídas de roca (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamiento de roca (bloque) Volcamiento Flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (de arena, limo, detritos, roca fracturada)
Reptación	Reptación de suelos Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	
Movimientos complejos	

## 2.2.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Tiene como objeto analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales y la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales (Suárez, 2007).

El uso de software es la metodología más recomendada (Suárez, 2007), por la gran cantidad de utilidades que presenta, posibilidad de analizar muchas variables en poco tiempo, y ya que hacia donde más se dirigen las actuales investigaciones (Stead & Coggan, 2012), además el modelamiento matemático de macizos rocosos solo puede realizarse con el uso de softwares por su complejidad de sus ecuaciones (Gavilanes & Andrade, 2007).

En la Figura 5 se muestran los métodos de análisis con software para movimientos de masa que existen en la actualidad.

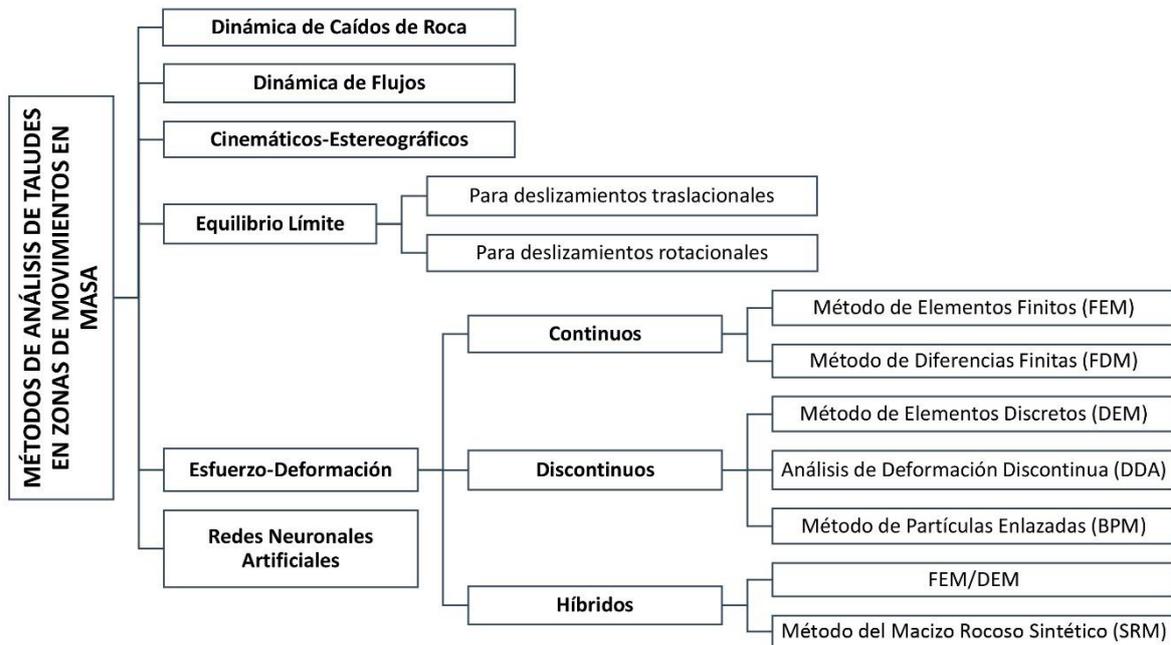


Figura 5. Métodos de análisis para movimientos en masa. (Suárez, 2007) y (Jing, 2003).

La descripción de los parámetros críticos, ventajas y limitaciones de estos métodos se presentan en la Tabla 6.

La Figura 6 muestra como los métodos cinemáticos y de equilibrio límite son prácticos para el análisis de movimientos en masa de traslación o rotación simples, pero se requiere utilizar métodos numéricos si el mecanismo es complejo y cuando se presenta una combinación de diversos procesos de fallamiento se requiere la utilización de métodos híbridos.

Tabla 6. Características de las metodologías utilizadas en la modelación de movimientos en masa. (Eberhardt, 2003), (Suárez, 2007) y (Bobet, 2010).

Método	Parámetros críticos	Ventajas	Limitaciones
Dinámica de caídos de roca	Geometría del talud, tamaño y forma de los bloques y coeficiente de restitución.	Permite analizar la dinámica de los bloques y existen programas en dos y tres dimensiones.	Existe poca experiencia de su uso en los países tropicales.
Dinámica de flujos	Relieve del terreno, concentración de sedimentos, viscosidad y propiedades de la mezcla suelo-agua.	Se puede predecir el comportamiento, velocidades, distancia de recorrido y sedimentación de los flujos.	Se requiere calibrar los modelos para los materiales de cada región. Los resultados varían según el modelo utilizado.
Límite de equilibrio	Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, eso unitario, niveles freáticos y cargas externas.	Existe una gran cantidad de softwares. Se obtiene un número de factores de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua.	Genera un número de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere según el método. No incluye análisis de las deformaciones.
Cinemáticos estereográficos para taludes en roca	Geometría y características de las discontinuidades. Resistencia a las discontinuidades.	Es relativamente fácil de utilizar. Permite la identificación y análisis de bloques críticos, utilizando teoría de bloques. Pueden combinarse con técnicas estadísticas.	Útiles para el diseño preliminar. Se requiere criterio de ingeniería para determinar cuáles son las discontinuidades críticas. Evaluar las juntas.
Esfuerzo deformación continuos	Geometría del talud, propiedades de los materiales, propiedades elásticas, elastoplásticas y de “creep”. Niveles freáticos, resistencia.	Permite simular procesos de deformación. Permite determinar la deformación del talud y el proceso de falla. Existen programas para trabajar en dos y tres dimensiones. Se puede incluir análisis dinámico y análisis de “creep”	Es complejo y no lineal. Comúnmente no se tiene conocimiento de los valores reales a utilizar en la modelación. Se presentan varios grados de libertad. No permite modelar roca muy fracturada.
Discontinuos Esfuerzo-Deformación	Geometría del talud, propiedades del material, rigidez, discontinuidades, resistencia y niveles freáticos.	Permite analizar la deformación y el movimiento relativo de bloques.	Existe poca información disponible sobre las propiedades de las juntas. Se presentan problemas de escala, especialmente en los taludes en roca.
Métodos híbridos	Combinación de parámetros de los métodos continuos y discontinuos	Los métodos acoplados de elementos finitos/distintos son capaces de simular la propagación y fragmentación de fracturas en macizos rocosos fracturados y/o estratificados.	La solución de problemas complejos requiere mayor capacidad de hardware y entrenamiento del usuario.
Redes Neuronales Artificiales	Propiedades de los macizos rocosos según su aplicación	Tienen la capacidad de “aprender” a solucionar problemas y “adaptarse”.	Requieren mayor investigación y desarrollo, poco uso práctico actual.

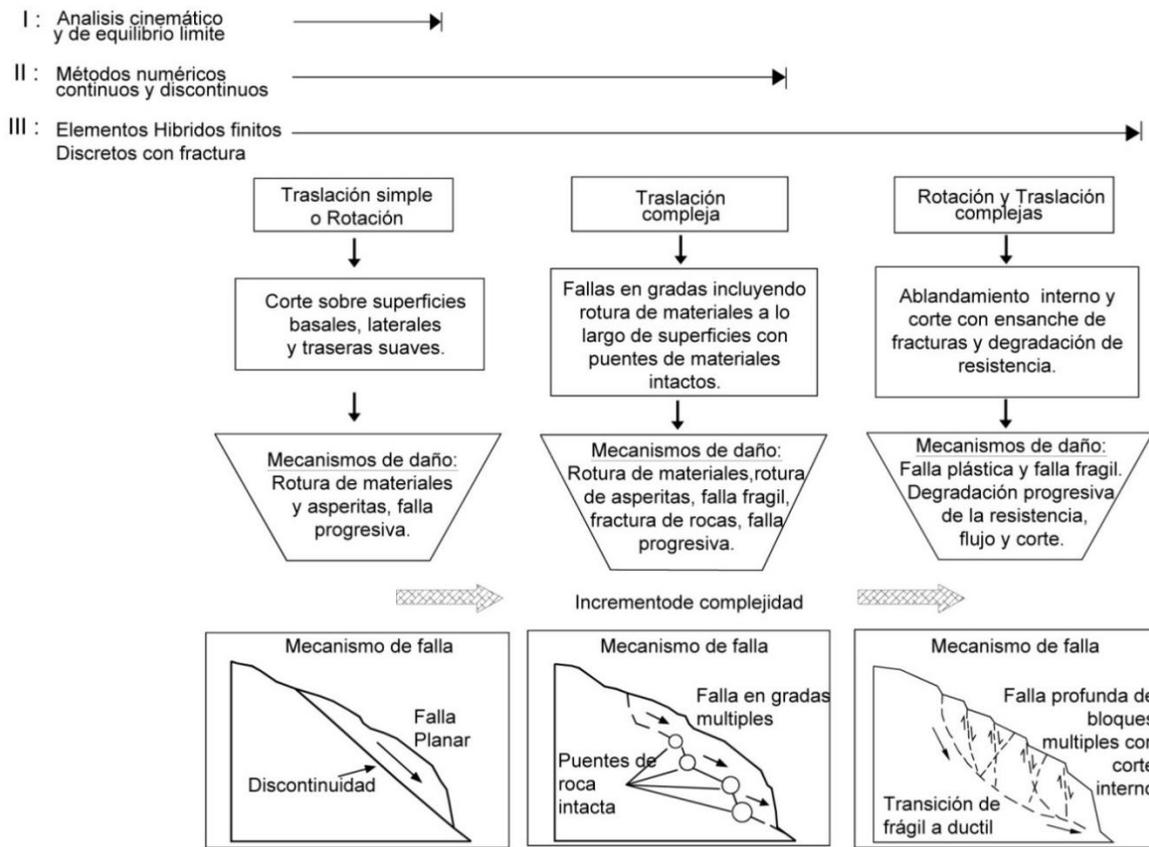


Figura 6: Diagrama que muestra el tipo de modelo que se recomienda utilizar de acuerdo con la complejidad de los movimientos (Stead, Eberhardt, & Coggan, 2006).

La Figura 7 muestra que para estudiar el inicio de un movimiento en masa (fallamiento) es adecuado los métodos de equilibrio límite, pero, si se quiere estudiar el proceso de transporte y depositación se requiere metodologías más complejas.

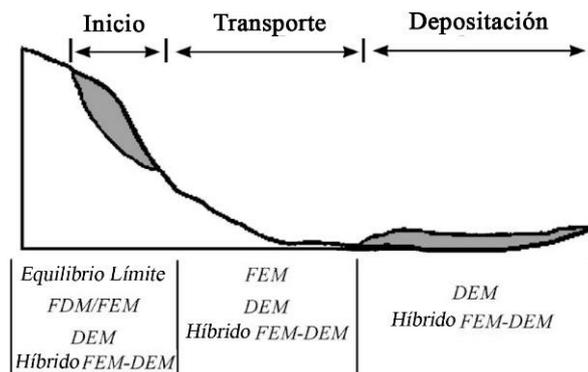


Figura 7. Varios estadios de un “análisis total de movimientos en masa” y las metodologías sugeridas. (Stead et al., 2006)

## 2.2.5 MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE

Consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los materiales del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla (Suárez, 2007).

La principal característica es que representa a los materiales geológicos como bloques rígidos. Existen diversos softwares según el mecanismo de rotura, como RocPlane, Swedge y Slide para roturas planares, en cuña y circulares respectivamente (Rocscience, 2016)

### 2.2.5.1 Método de dovelas

Es un método para fallas curvas o circulares, donde la masa de la parte superior de la superficie de falla se divide en una serie de tajadas verticales. El número de tajadas depende de la geometría del talud y de la precisión requerida para el análisis (Suárez, 2007).

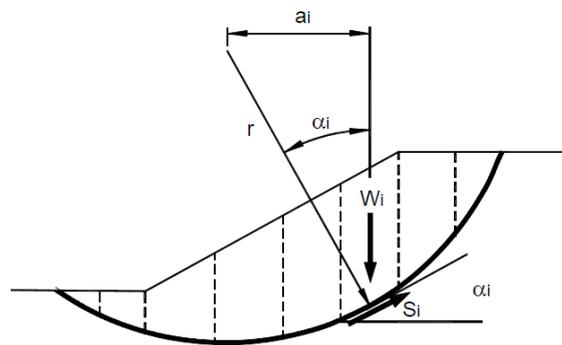


Figura 8. Esquema de un sistema típico de análisis con tajadas o dovelas. (Suárez, 2007).

Uno de los softwares comerciales más conocidos y utilizados con la metodología de equilibrio límite de dovelas es Slide (Rocscience, 2016) el cual contiene las principales y más difundidos enfoques (Bishop, Janbú, Spencer, Sarma, etc.), cada superficie de deslizamiento puede ser analizada, o se pueden aplicar métodos de búsqueda para localizar la superficie de deslizamiento crítico para una talud, además de poder aplicar análisis determinísticos (factor de seguridad) o probabilísticos (probabilidad de fallamiento).

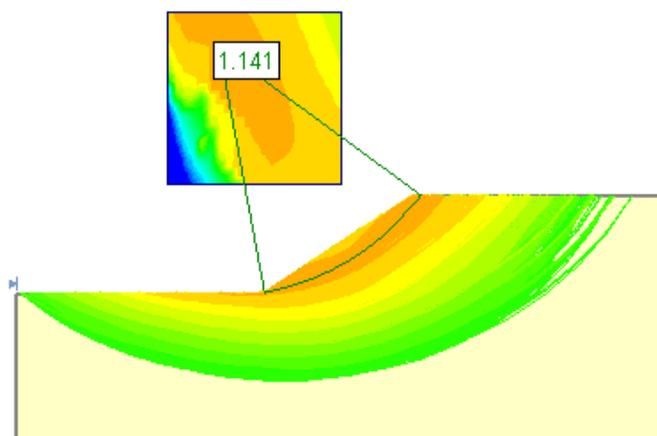
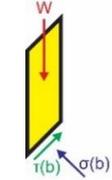
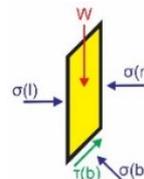
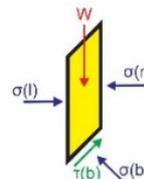
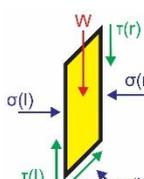
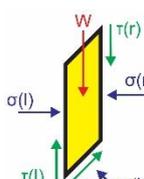
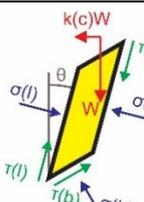


Figura 9. Círculo de falla crítico según su factor de seguridad en Slide. (Rocscience, 2016).

Las principales características de los métodos utilizados en Slide se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Características de las principales metodologías de equilibrio límite de dovelas.  $W$ =Peso de la dovela,  $t$ =resistencia cizallante,  $\sigma$ =resistencia normal,  $b$ =en la base,  $l$ =en el lado izquierdo,  $r$ =en el lado derecho,  $K(c)$ =factor de aceleración crítica,  $\theta$ =ángulo de inclinación. (Suárez, 2007), (Rocscience, 2016)

Método	Fuerzas inter-dovelas resultantes	Condición de Equilibrio Satisfecha		Superficie de falla	Fuerzas actuantes en cada dovela
		Fuerzas	Momentos		
(Fellenius, 1936)	No se toman en cuenta	no	si	circular	
(Bishop, 1955)	Son horizontales. No hay fuerzas cizallantes entre dovelas.	en x, no en y	si	circular	
Janbú (Janbú, 1954)	Son horizontales. Se utiliza un factor de corrección empírico para explicar las fuerzas de corte intersticiales.	si	si (corr)	cualquiera	
(U.S. Army Corps of Engineers, 1970)	Son paralelas a la superficie del suelo o igual a la pendiente media desde el principio hasta el final de la superficie de rotura.	si	no		
(Lowe & Karafiath, 1960)	Su dirección es igual a la media de la superficie del suelo y la pendiente de la base de cada dovela.	si	no	cualquiera	
(Spencer, 1967)	Tienen una pendiente constante a lo largo de la masa deslizante.	si	si	cualquiera	
(Morgenstern & Price, 1965)	Su dirección se define usando una función arbitraria. Se calculan los valores fraccionales de función necesarios para el balance de fuerzas y momentos.	si	si	cualquiera	
(Sarma, 1973)	Las inclinaciones de las interfaces de las dovelas varían hasta que se cumpla un criterio crítico. El criterio de resistencia cizallante se aplica a los lados y al fondo de cada dovela.	si	si	cualquiera	

## 2.2.6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Divide la masa de talud en unidades llamadas elementos finitos interconectados en sus nodos y bordes predefinidos, luego se formulan desplazamientos que presentan los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos en los puntos nodales, la condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente (Suarez, 2007). La principal ventaja de este método es que simula el proceso de fallamiento independientemente de la forma de la superficie de rotura, sus resultados son más precisos y es capaz de asumir diversos factores condicionantes y desencadenantes.

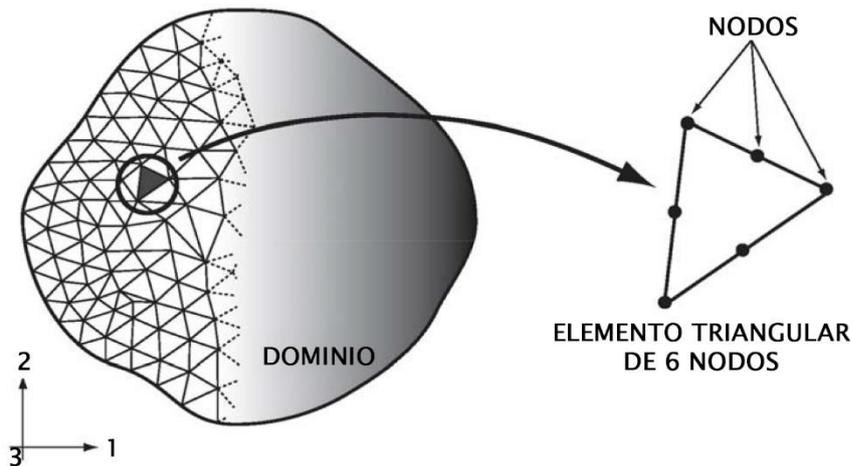


Figura 10. Metodología de discretización del dominio en elementos finitos. (Bobet, 2010).

### 2.2.6.1 Factor de seguridad con el método del Factor de Reducción de Resistencia

Con elementos finitos el factor de seguridad es evaluado realizando una reducción gradual de los parámetros de resistencia al cortante de los materiales “Strength Reduction Factor (SRF) e induciendo a una falla. Inicialmente, la fuerza de gravedad se aplica en estado elástico para obtener la primera distribución de esfuerzos en todo el talud (Suárez, 2007). Luego, la reducción gradual de la resistencia va a producir un esfuerzo residual en los elementos fallados y así se evalúa la fuerza residual. Así el valor inicial SRF se asume lo suficientemente pequeño para obtener un problema elástico, luego va aumentando etapa por etapa hasta que se desarrolle una falla global del talud (Popescu, Ugai, & Trandafir, 2000).

El software RS2 (Phase2) en 2D o RS3 en su versión en 3D (Rocscience, 2016) es uno de los más utilizados en la actualidad, utiliza una metodología de Reducción de Resistencia Cizallante “Shear Strength Reduction (SSR)” para determinar el factor crítico de reducción (SRF). Puede ser usado para un gran rango de proyectos de ingeniería.

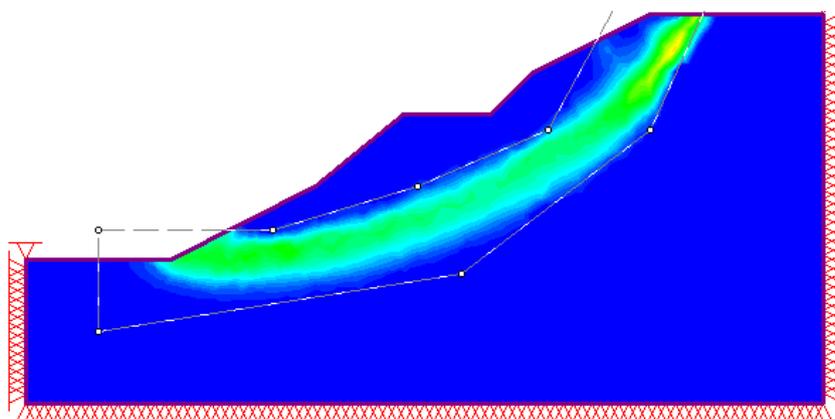


Figura 11. Modelamiento de una falla en un talud con la metodología del SRF en RS2. (Rocscience, 2016).

## 2.2.7 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

Representa al talud por zonas que forman una malla de acuerdo con la geometría elegida. Utiliza el cálculo de “Lagrange” para modelar deformaciones de gran escala y del colapso de los materiales. El esquema general del análisis consiste en el reequilibrio del sistema y el estudio de las condiciones de falla (Suárez, 2007). Para el cálculo del factor de seguridad también utiliza la metodología de Reducción de Resistencia Cizallante.

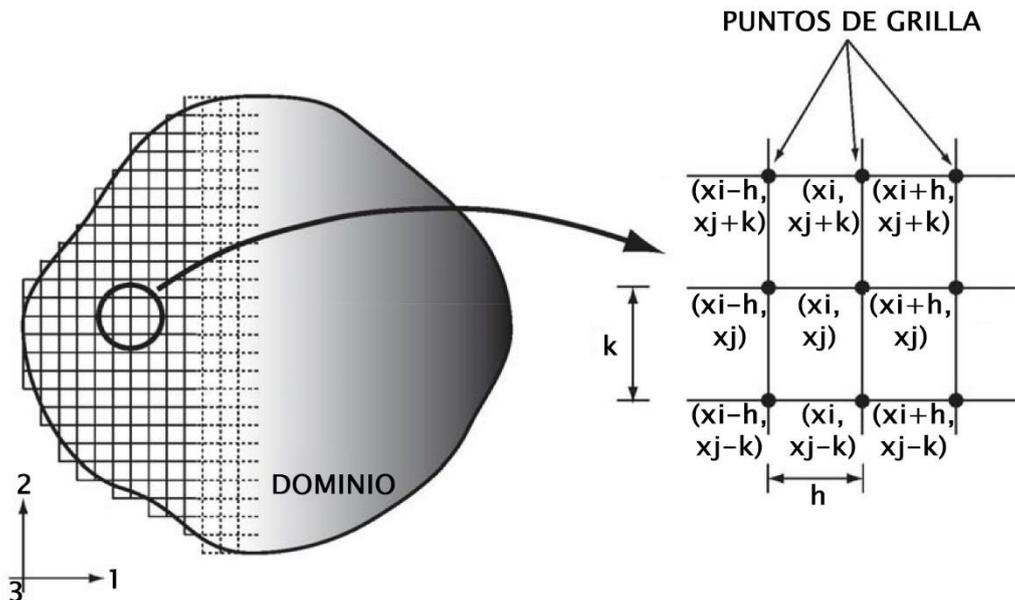


Figura 12. Metodología de discretización con diferencias finitas. (Bobet, 2010).

El software más difundido con la metodología de elementos finitos es FLAC de sus ciclos en inglés en su versión 2D y FLAC3D en su versión 3D. Utiliza una formulación de diferencias finitas explícita que pueden modelar comportamientos complejos como problemas que consisten de muchos pasos, grandes desplazamientos y tensiones, comportamiento no lineal de materiales, o sistemas inestables (incluso casos de fallamiento de grandes áreas, o colapso total), utilizándose ampliamente en la geotecnia (Itasca, 2016).

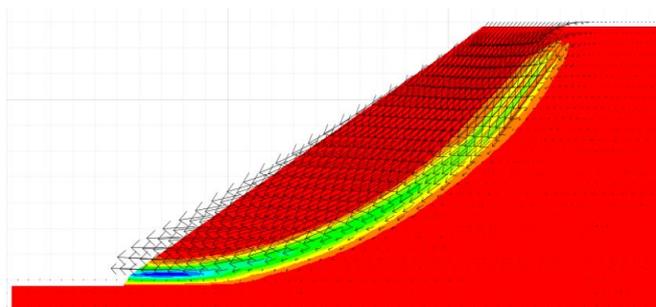


Figura 13. Análisis del factor de seguridad con el Software FLAC. (Itasca, 2016).

## 2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

**Esfuerzo Cortante ( $\tau$ ) (shear stress).** Esfuerzo con dirección paralela al plano sobre el que actúa (Suárez, 2007).

**Esfuerzo Normal ( $\sigma_n$ ) (normal stress).** Esfuerzo en dirección perpendicular al plano sobre el cual actúa (González et al , 2003).

**Esfuerzo Total ( $\sigma$ ) (total stress).** Esfuerzo igual a la suma del esfuerzo efectivo y la presión de los fluidos de los poros (generalmente agua y/o aire) (Gavilanes & Andrade, 2007)..

**Estabilidad (slope stability).** Condición de estabilidad de un talud o ladera (Suárez, 2007).

**Factor de Seguridad (safety factor/factor of safety):** Es la resistencia global frente a cargas externas que tiene el macizo rocoso antes de sufrir deformaciones permanentes en su estructura (González et al., 2003).

**Ladera (natural slope).** Superficie natural inclinada de un terreno (Suárez, 2007).

**Macizo Rocos (Rock mass).** Conjunto de material de roca in situ y sus discontinuidades (Suárez, 2007).

**Método dinámico:** Análisis con el que se pueden obtener detalles relacionados con esfuerzos, deformaciones cíclicas o permanentes. (Gavilanes & Andrade, 2007)..

**Método pseudo-estático:** Análisis sísmico en el cual las cargas del sismo son simuladas como cargas estáticas horizontales y verticales. (González et al , 2003).

**Talud (slope).** Superficie artificial inclinada de un terreno que se forma al cortar una ladera, o al construir obras como por ejemplo un terraplén (Suárez, 2007).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio se encuentra en el Sector Calispuquio, ubicado al sur-oeste de la ciudad de Cajamarca, con un área de 1km<sup>2</sup> (100 has), las coordenadas UTM-WGS84 de sus vértices se describen en la Tabla 8 y la ubicación general se pueden observar en el Anexo C, P-01, la zona se aprecia mejor en el Anexo C, P-02.

*Tabla 8. Coordenadas UTM-WGS84 de los vértices de la zona de estudio.*

Vértice	Coordenadas UTM-WGS84	
	Este	Norte
1	774000	9207000
2	774000	9206000
3	773000	9206000
4	773000	9207000

Políticamente se ubica en:

- ✓ País: Perú
- ✓ Región, provincia y distrito: Cajamarca

#### 3.2 ACCESIBILIDAD

Existen dos rutas de acceso a la zona de investigación, una por la carretera Cajamarca-Cumbemayo y la otra por la carretera Cajamarca-Ruinas de Layzón, las características de estas rutas se describen en la Tabla 9.

Tabla 9. Rutas de acceso a la zona de estudio.

Desde	Hacia	Estado	Distancia	Tiempo en automóvil	Tiempo caminando
Plaza mayor de Cajamarca	Cumbemayo	Afirmada	5km	20min	1hr.
Plaza mayor de Cajamarca	Ruinas de Layzón	Afirmada	3km	15min	40min

### 3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.3.1 TIPO Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

El problema investigado tiene características descriptivas, comparativas, explicativas y relacionantes. Los métodos de investigación serán: Descriptivo, analítico, comparativo, deductivo y explicativo.

#### 3.3.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO

Todos los taludes y laderas del sector Calispuquio.

#### 3.3.3 MUESTRA

Los taludes y laderas con mayor inestabilidad del sector Calispuquio.

#### 3.3.4 UNIDAD DE ANÁLISIS

Se analizarán la estabilidad utilizando el método de Equilibrio Límite, Diferencias Finitas y Elementos Finitos.

### 3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN

#### 3.4.1 TÉCNICAS

- Levantamiento topográfico: Utilizado para la obtención de la superficie topográfica actual, necesaria como geometría externa para el modelamiento de estabilidad.
- Cartografiado temático: Consistente en realizar el cartografiado por factores condicionantes de la zona (pendientes, geología, etc.)
- Documentación por medio de tablas: Recopilación de la información geomecánica de las unidades geológicas para utilizarlas en el modelamiento de estabilidad.
- Ensayos geomecánicos de campo y laboratorio: Cálculo de las propiedades geomecánicas en campo (resistencia con martillo de geólogo) o en laboratorio (granulometría de suelos).

### **3.4.2 INSTRUMENTOS Y MATERIALES**

- Picota marca estwing mango largo: Herramienta necesaria para extraer muestras de roca y probar la resistencia de las mismas en campo.
- Lápiz rayador 88CM General Tools: Herramienta utilizada para identificar minerales por medio de su dureza relativa.
- Lupa de 10x Baush & Lamp: Herramienta óptica utilizada para visualizar mejor los cristales de una roca.
- Lápices y lapiceros: Utilizados para anotaciones y cartografiado.
- Cámara digital Cannon PowerShot: Instrumento utilizado para el registro fotográfico.
- Protactor Escala 1/1000: Utilizado para el cartografiado local.
- Brújula Brunton mod. 5006: Utilizado para la toma de datos de direcciones de discontinuidades y planos de estratificación
- GPS Garmin eTrex 20: Instrumento utilizado para la obtención de las coordenadas para la ubicación de puntos.
- Tablas geomecánicas y de registro: Utilizados como guías para la documentación de las propiedades de resistencia de los macizos rocosos.
- Laptop Lenovo: Instrumento utilizado para el procesamiento de los datos y redacción de los informes.

### **3.4.3 SOFTWARE**

- RocData v5.006: Utilizado para la obtención de las propiedades geomecánicas de los materiales geológicos necesarios para el modelamiento de estabilidad.
- Slide v7.017: Software utilizado para el cálculo del factor de seguridad utilizando la metodología de equilibrio límite.
- RS2 (Phase2) v9.016: Software utilizado para el cálculo del factor de seguridad utilizando la metodología de elementos finitos.
- FLAC v8.00.436: Software utilizado para el cálculo del factor de seguridad utilizando la metodología de diferencias finitas.
- FLAC SLOPE v8.00.436: Complemento del software FLAC v8 con atajos y aplicaciones directas para el análisis de estabilidad de taludes.
- AutoCAD y AutoCAD CIVIL 3D v2016: Utilizados para la creación de los perfiles.
- ArcMap v10.3: Software utilizado para la creación de los planos
- Strater v5.0.710: Software utilizado para la creación de columnas estratigráficas
- CorelDraw vX8: Software utilizado para la creación de gráficos.
- Microsoft Office v2016 (Word, Excel, PowerPoint): Softwares utilizados para la elaboración de los informes y presentaciones.

## **3.5 PROCEDIMIENTO Y TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

### **3.5.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO**

Se cuenta con una un Modelo Digital de Elevaciones a un detalle de 30m (fuente SRTM), pero para lograr un mejor análisis se realizó un levantamiento topográfico en la zona, el resultado final se muestra en el Anexo C, P-03.

### **3.5.2 CARTOGRAFIADO TEMÁTICO**

Se realizó un cartografiado temático a detalle (1/4000) para poder analizar las variables condicionantes y desencadenantes del riesgo geológico de la zona de estudio además para definir las unidades que se utilizarán analizar la estabilidad con los softwares geotécnicos.

Los mapas temáticos cartografiados en campo:

- ✓ Geomorfología
- ✓ Geología
- ✓ Hidrogeología
- ✓ Cobertura vegetal y uso de suelos

En base a imágenes satelitales, al modelo digital de elevaciones (MED) y las fuentes geográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) se han diseñado los siguientes mapas:

- ✓ Ubicación
- ✓ Imagen Satelital
- ✓ Topográfico
- ✓ Pendientes

### **3.5.3 ANÁLISIS POR MEDIO DE TABLAS**

#### **3.5.3.1 Documentación de las propiedades geomecánicas de los taludes de suelos**

Para el registro de las propiedades geomecánicas de los taludes de suelos se el Anexo B.1, con el objetivo de conocer sus propiedades ingenieriles en base a la clasificación SUCS.

### 3.5.3.2 Documentación de las propiedades geomecánicas de rocas

Para el registro de las propiedades geomecánicas de los taludes de roca se utilizó el formato del Anexo B.2, para calcular las variables de entrada para el análisis de estabilidad con softwares.

## 3.6 ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Se presentan dos casos, uno donde se analizan deslizamientos existentes y otro donde se analizan zonas inestables, describiendo las viables para cada caso en la Figura 14.

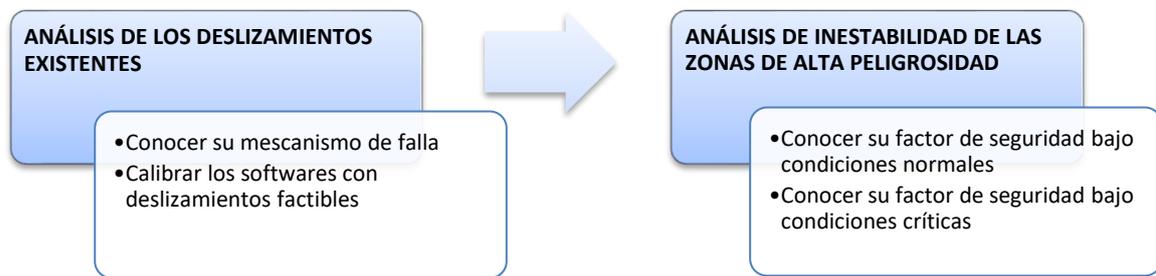


Figura 14. Metodología general del análisis de las laderas y taludes.

### 3.6.1 ANÁLISIS DE INESTABILIDAD LOS DESLIZAMIENTOS EXISTENTES

Se realizó un análisis de los deslizamientos existentes, para conocer los factores que los desencadenaron y que podrían afectar a las zonas colindantes, además sirvió para calibrar y comparar resultados con los softwares analizados en la presente investigación.

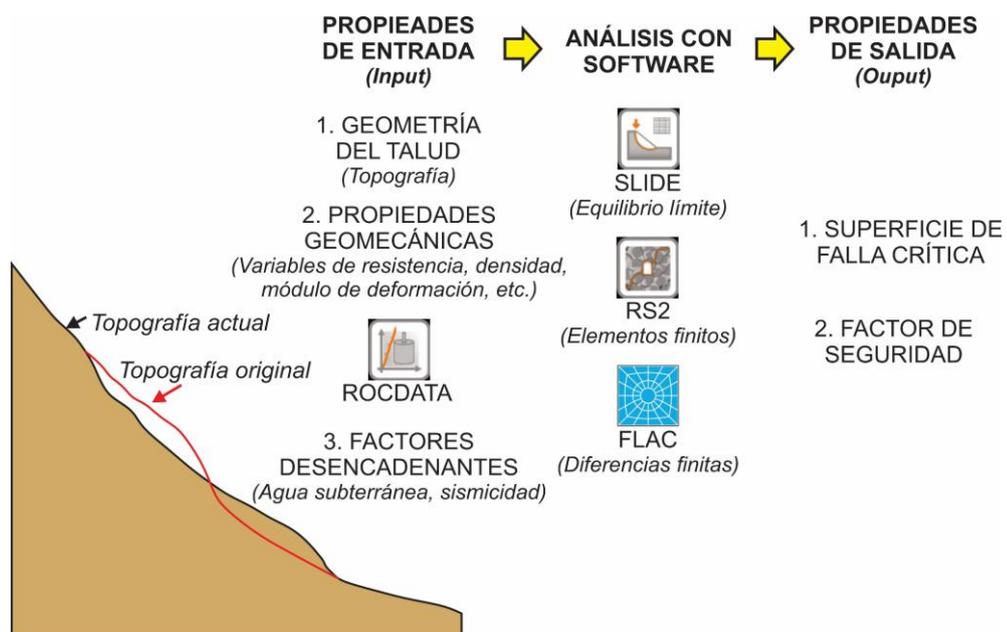


Figura 15. Metodología del análisis de inestabilidad de los deslizamientos existentes en la investigación.

### 3.6.2 ANÁLISIS DE INESTABILIDAD

Las zonas de alta peligrosidad identificadas fueron evaluadas con los softwares en condiciones normales (actuales) y en condiciones críticas (máxima sismicidad y saturación posibles), para identificar cuales requieren estabilizarse con medidas preventivas.

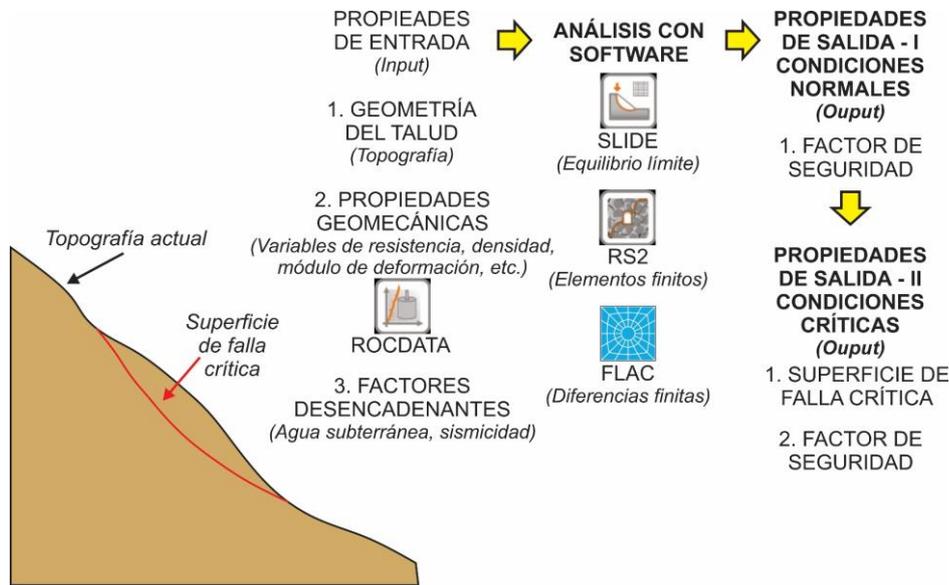


Figura 16. Metodología del análisis de inestabilidad de las laderas y taludes críticos en la investigación.

## 3.7 VARIABLES DE INESTABILIDAD

### 3.7.1 VARIBALES CONDICIONANTES

Se elaboraron mapas temáticos para las variables condicionantes, la de sismicidad y saturación se consideran uniformes por las dimensiones de la misma (1Km<sup>2</sup>)

#### 3.7.1.1 Pendientes

Se utilizó las unidades de Zavala & Rosado (2011), el plano final es el Anexo C. P-04 y los resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Extensión superficial de las unidades de pendientes cartografiadas en el área de estudio.

TERRENOS	SIMBOLOGÍA	RANGO	AREA (has)	PORC %
Llanos	LL	<1°	0.04	0.04
Inclinados con suave pendiente	ISP	1°-5°	0.95	0.95
Pendiente moderada	PM	5°-15°	37.57	37.57
Pendiente fuerte	PF	15°-25°	51.23	51.23
Pendiente escarpada	PE	25°-45°	10.21	10.21



Figura 17. Distribución del área de las pendientes en el área de estudio.

### 3.7.1.2 Geomorfología

Se utilizó las unidades de Villota (2005), el plano final es el Anexo C. P-05 y los resultados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Extensión superficial de las geoformas cartografiadas en el área de estudio.

GEOFORMA	SIMBOLOGÍA	AREA (has)	PORC %
Colina fluvio-erosional	Cfe	92.43	92.43
Pie de monte aluvial	P-al	4.05	4.05
Pie de monte coluvio-aluvial	P-co/al	3.53	3.53

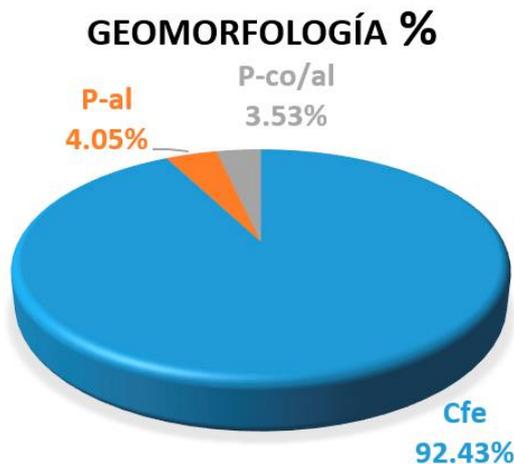


Figura 18. Distribución del área de las geoformas en el área de estudio.

### 3.7.1.3 Geología

Las unidades geológicas cartografiadas en base a los estándares del INGEMMET y presentadas por Reyes (1980) se muestran en el plano del Anexo C. P-06, la columna estratigráfica se muestra en el Anexo D y los resultados se resumen en la Tabla 12.

Tabla 12. Extensión superficial de las unidades lito-estratigráficas cartografiadas en el área de estudio.

	FORMACIÓN	SIMBOLOGÍA	AREA (has)	PORC %
Unidades Inconsolidadas Cuaternarias	Depósito coluvio-aluvial	Qh-co/al	3.53	3.53
	Depósito deluvial	Qh-de	9.69	9.69
	Depósito coluvial	Qh-co	20.85	20.85
	Depósito aluvial	Qh-al	4.05	4.05
Unidades Volcánicas del Paleógeno/Neógeno	Volcánico Porculla	PN-vp	55.23	55.23
Unidades Sedimentarias Cretácicas	Formación Chúlec	Ki-chu	3.92	3.92
	Formación Inca	Ki-in	2.27	2.27
	Formación Farrat	Ki-f	0.47	0.47

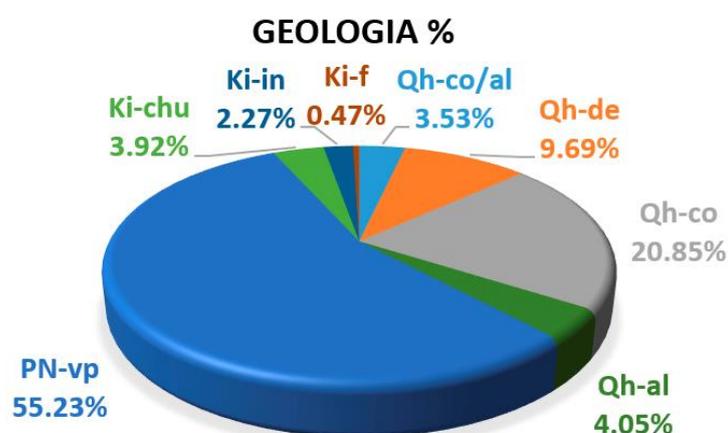


Figura 19. Distribución del área de las unidades lito-estratigráficas en el área de estudio

### 3.7.1.3.1 Unidades Sedimentarias Cretácicas

#### GRUPO GOYLLARISQUIZGA

##### Formación Farrat (Ki-f)

Se ubican afloramientos de esta formación al sur-este de la zona de estudio, constituyendo macizos rocosos de areniscas competentes con intercalaciones de limolitas y en algunos casos lutitas, su espesor promedio en la zona de estudio es de 250m.



*Foto 1. Areniscas cuarzosas de la Formación Farrat al sur de la zona de estudio.*

### **Formación Inca (Ki-in)**

Se encuentran afloramientos de esta formación en los cortes de carretera cerca al deslizamiento sur, está constituida por lutitas ferruginosas intercaladas con algunos niveles de areniscas y limolitas, se encuentra fuertemente fracturada y alterada por acción del tectonismo de la zona, su espesor promedio es de 150m.



*Foto 2. Lutitas ferruginosas intercaladas con limolitas pertenecientes a la Formación Inca cerca al deslizamiento sur.*

## **GRUPO CRISNEJAS**

### **Formación Chúlec (Ki-chu)**

Los afloramientos de esta unidad se presentan tanto en la parte sur de la zona de estudio como en la parte central, caracteriza por calizas wackestone con abundantes fósiles, tiene un color crema amarillento por alteración, su espesor promedio es de 250m.



*Foto 3. Calizas wackestone intercaladas con lutitas de la Formación Chúlec al sur de la zona de estudio.*

### ***3.7.1.3.2 Unidades Volcánicas del Paleógeno***

#### **GRUPO CALIPUY**

##### **Formación Porculla (PN-vp)**

Se ubica sobreyaciendo a las unidades sedimentarias cretáceas discordantemente, y se caracteriza por flujos piroclásticos de pómez y cenizas, gris blanquecinas, ricos en cristales de composición riolítica, tiene un espesor aproximado de 300m.



*Foto 4. Flujos piroclásticos de pómez y cenizas de la formación Porculla en la zona central del área de estudio.*

### ***3.7.1.3.3 Unidades Inconsolidadas del Cuaternario - Holoceno***

##### **Depósitos Aluviales (Qh-al)**

Se encuentran en las partes bajas de las quebradas que pasan por el área de estudio, al este de la misma. Están conformados principalmente por suelos gravo-arcillosos (GC) y gravo-limosos (GM).



*Foto 5. Depósito aluvial con gravas y arcillas de alta plasticidad en las riveras de la quebrada Calispuquio.*

### **Depósitos Coluviales (Qh-de)**

Son las acumulaciones de detritos originadas por deslizamientos gravitacionales, se acumulan principalmente al sur de la zona de estudio, están conformados por suelos gravo-arcillosos (GC) y arcillas de alta plasticidad (CH).



*Foto 6. Cuaternario Coluvial de gravas y arcillas producto del deslizamiento en el cerro Layzón.*

### **Depósitos Deluviales (Qh-co)**

Está conformado por materiales cuaternarios ubicados en las laderas de los cerros, principalmente en el cerro antenas, su composición depende de la formación sobre la que subyacen, presentan una buena clasificación de detritos y muestran una transición de meteorización desde suelo fino/orgánico en la parte superior, hasta transición al macizo rocoso en la parte inferior, dando suelos principalmente de limos de alta plasticidad (MH) y arcillas de mediana a baja plasticidad (CL)



Foto 7. Depósito Cuaternario Deluvial de limos y arcillas cubriendo al cerro Antenas.

### Depósitos Coluvio-Aluviales (Qh-co/al)

Son depósitos recientes de movimientos donde el agua fue un elemento principal en el deslizamiento, generando una mezcla de las variables gravitacionales de corto transporte (coluvial) y de traslado por saturación parcial o total (aluvial). Sus suelos son principalmente arcillas de baja plasticidad (CL) y gravas arcillosas (GC).



Foto 8. Cono coluvio-aluvial en el cerro Antenas en suelos arcillosos de baja plasticidad.

#### 3.7.1.4 Hidrogeología

Se utilizó clasificación de acuíferos del INGEMMET, el cartografiado se muestra en el plano del Anexo C. P-07 y los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Extensión superficial de los acuíferos cartografiados en el área de estudio.

HIDROGEOLOGÍA	SIMB.	FORMACIÓN	AREA (has)	PORC %
Acuífero fisurado	A-f	Ki-f	0.47	0.47
Acuífero poroso consolidado	A-pc	PN-vp	55.23	55.23
Acuífero poroso no consolidado	A-pnc	Qh-al, Qh-co, Qh-de, Qh-co/al)	38.11	38.11
Acuitardo	Ac	Ki-in, Ki-chu	6.19	6.19

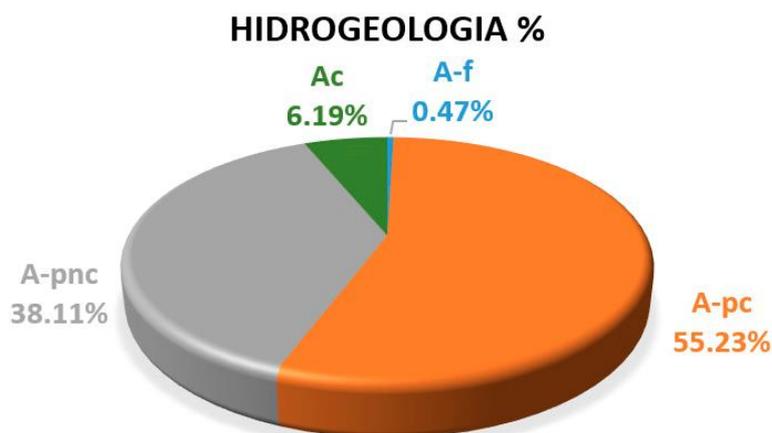


Figura 20. Distribución del área de los acuíferos en el área de estudio.

### 3.7.1.5 Cobertura Vegetal

Se utilizó clasificación áreas de cobertura vegetal de la ZEE-OT-Cajamarca, el cartografiado se muestra en el plano del Anexo C. P-08 y los resultados se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Extensión superficial de las zonas de cobertura vegetal cartografiadas en el área de estudio.

COBERTURA	SIMBOLOGÍA	AREA (has)	PORC %
Área deforestada	AD	40.01	40.01
Área forestada	AF	16.80	16.80
Matorral seco	MS	37.24	37.24
Matorral semi-seco	MSH	5.94	5.94



Figura 21. Distribución del área de las zonas de cobertura vegetal en el área de estudio.

### 3.7.2 GEOMETRÍA DE LAS LADERAS Y TALUDES

Se diseñaron 8 perfiles para el análisis de los softwares a partir del MED combinado con el levantamiento topográfico. Las unidades lito-estratigráficas fueron proyectadas en base al cartografiado. Los resultados se muestran en el Anexo E, y se describen en la Tabla 15.

Tabla 15. Ubicación de los perfiles diseñados para el análisis.

PERFIL	PUNTO	COORD. ESTE	COORD. NORTE	LONGITUD (m)
A-A'	A	773291.77	9206314.98	189.25
	A'	773414.24	9206459.26	
B-B'	B	773324.48	9206717.54	432.34
	B'	773691.89	9206489.66	
C-C'	C	773600.89	9206323.64	336.66
	C'	773851.00	9206549.00	
D-D'	D	773695.00	9206902.00	393.15
	D'	773973.00	9206624.00	

Cada perfil tubo un objetivo, el cual era poder comparar resultados de los softwares en condiciones diferentes, así se pueden encontrar perfiles con topografías originales y topografías actuales, en suelos y rocas, además de laderas y taludes.

Tabla 16. Características de los perfiles diseñados para el análisis.

PERFIL	SUBPERFIL	TIPO	MATERIAL CRÍTICO
A-A'	1: Topografía original	Ladera	QH-co: Suelo gravo-arcilloso
	2: Topografía actual	Ladera	Qh-co/al: Suelo arcillo-gravoso
B-B'	1: Topografía original	Ladera	Qh-de: Suelo limo-arcilloso
	2: Topografía actual	Ladera	Qh-co/al: Suelo arcillo-gravoso
C-C'	1: Topografía actual	Ladera	QH-co: Suelo gravo-arcilloso
	2: Diseño carretera	Talud	Ki-in: Macizo rocoso heterogéneo disturbado
D-D'	1: Topografía actual	Ladera	Qh-de: Suelo limo-arcilloso
	2: Diseño carretera	Talud	PN-vp: Macizo rocoso homogéneo de baja resistencia



Figura 22. Ubicación de los perfiles de análisis en la zona de estudio en Google Earth.

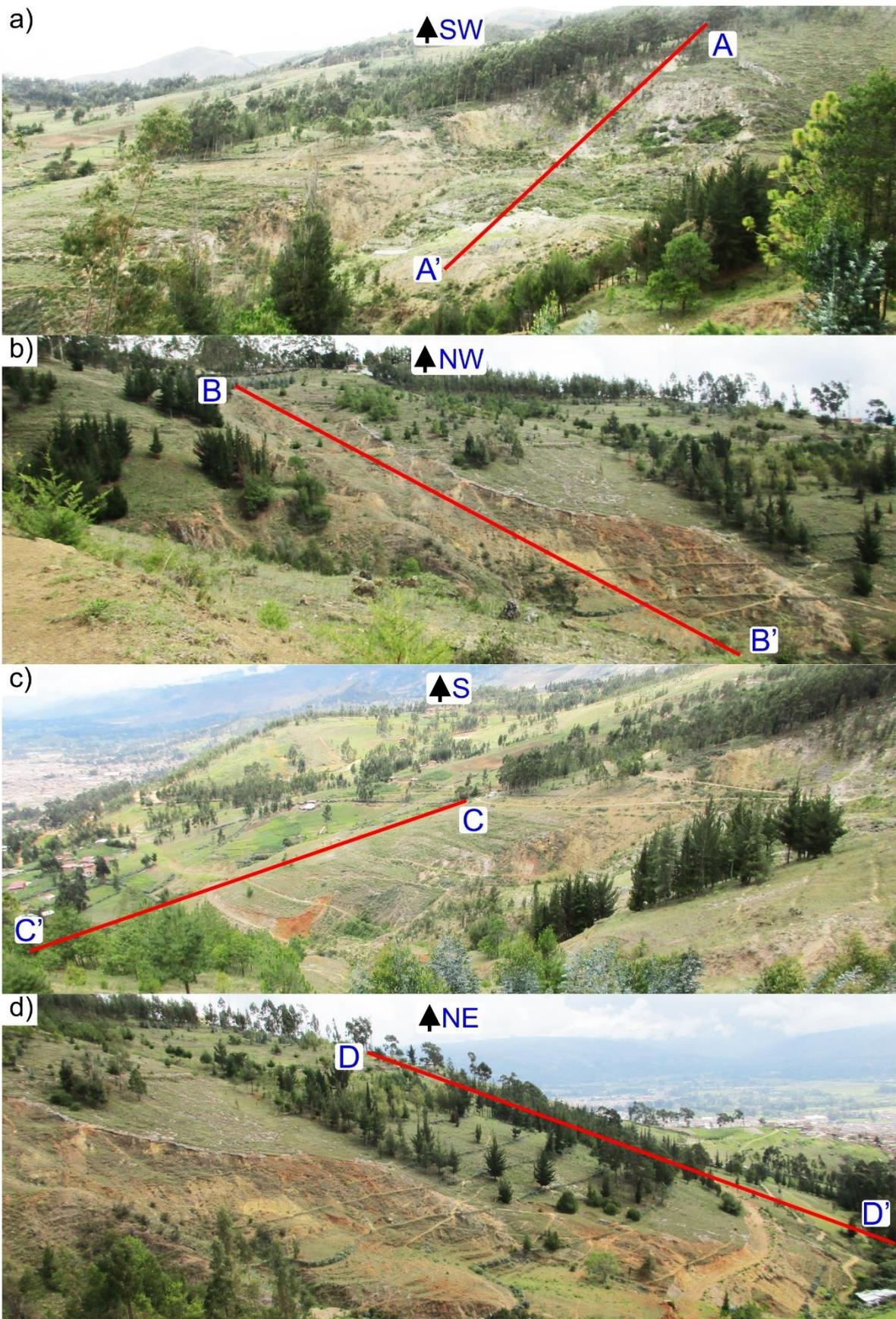


Foto 9. Detalle de la ubicación de los perfiles: a) A-A', vista hacia el SW; b) B-B', vista hacia el NW; c) C-C', vista hacia el S; d) D-D', vista hacia el NE.

### 3.7.3 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS

Se realizaron 8 estaciones geomecánicas, una para cada unidad geotécnica, las mismas que se correlacionan a las unidades lito-estratigráficas cartografiadas.

En cada estación se utilizó las tablas geomecánicas y de recolección de datos especificados en la sección 3.5.3 según el material presente.

Los datos de campo fueron procesados con el software RocData v5 para obtener las propiedades geomecánicas necesarias como datos de entrada para los softwares de análisis, los resultados se muestran en el Anexo F y se resumen en la Tabla 17.

Tabla 17. Características y ubicación de las estaciones geomecánicas para cada unidad geotécnica.

UNIDAD GEOTÉCNICA	MATERIAL	CRITERIO DE ROTURA	COORDENADAS DE LA ESTACION		
			ESTE	NORTE	COTA
Ki-f	Macizo rocoso homogéneo	Hoek-Brown	773954	9206030	2935
Ki-in	Macizo rocoso heterogéneo	Hoek-Brown	773750	9206564	2876
Ki-chu	Macizo rocoso heterogéneo	Hoek-Brown	773639	9206214	2940
PN-vp	Macizo rocoso homogéneo	Hoek-Brown	773442	9206196	2989
Qh-al	Suelo arcillo-gravoso	Mohr-Coulomb	773801	9206515	2868
Qh-co	Suelo gravo-arcilloso	Mohr-Coulomb	773367	9206364	2976
Qh-de	Suelo limo-arcilloso	Mohr-Coulomb	773630	9206570	2899
Qh-co/al	Suelo gravo-arcilloso	Mohr-Coulomb	773444	9206458	2933

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

### 3.7.4 VARIABLES DESENCADENANTES

Las suposiciones desencadenantes fueron:

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

Una descripción más detallada de las condiciones de análisis se presenta en la Tabla 18.

Tabla 18. Condiciones desencadenantes en los utilizados en los análisis.

AN.	CONDICIÓN	GRAV. (m/s <sup>2</sup> )	Kh	Kv	NIVEL FREÁTICO	APLICACIÓN
1	Normal	9.81	0	0	Ausente	En todos los análisis
2	Sismicidad máxima	9.81	0.263	0.132	Ausente	En todos los análisis
3	Saturación media	9.81	0	0	Altura media del material crítico	Cuando el FS en el An. 1 es cercano a 1
4	Saturación total	9.81	0	0	Topografía superficial del talud	Cuando el FS en el An. 1 es alto y/o cuando es mayor a 1 en el An. 3
5	Sismicidad máxima y saturación media	9.81	0.263	0.132	Altura media del material crítico	Cuando el FS en el An. 1 es alto y/o cuando es mayor a 1 en el An. 3
6	Sismicidad máxima y saturación total	9.81	0.263	0.132	Topografía superficial del talud	Cuando el FS es alto y/o cuando con es mayor a 1 en el An. 5

A continuación, se denotas algunos puntos destacables para el análisis:

1. Las componentes sísmicas horizontales y verticales son obtenidas bajo estas variables:
  - a. Zona sísmica: 4, aceleración máxima: 0.3-0.4 gal = 0.35 gal (promedio)
  - b. Coeficiente de amplificación topográfica: 1.2 (taludes mayores a 30m aislados)
  - c. Categoría de perfil estratigráfico: B (1.25, suelos duros, mediana a alta cohesión)
  - d. Amplificación estratigráfica “Kh”: 0.263
  - e. Parámetros de Zona “Kv”: 0.132
2. La componente sísmica horizontal será siempre en dirección del talud y la componente sísmica vertical será siempre a favor de la gravedad.
3. La geometría del nivel freático tanto para la condición de saturación media y saturación total se puede visualizar en los perfiles del Anexo E.
4. Los perfiles A-A’1, A-A’2, B-B’1, B-B’2 y C-C’1 han sido centrados en la zona crítica para el software FLAC por motivos de validación de geometría y/o grilla, el área de análisis final también se puede ver en los perfiles del Anexo E.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS**

##### **4.1.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON LOS TRES SOFTWARES**

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

1. Los métodos seleccionados por ser los más contemporáneos y realizar el equilibrio de mayor cantidad de variables (más exhaustivo) fueron: Spencer, Cuerpo de Ingenieros N°2, Lowe-Karafiath, GLE / Morgenstern-Price, Sarma.
2. El método de búsqueda de la falla crítica fue el de “Auto Refine Search” ya que es mejor método para búsqueda de fallas críticas no evidentes, al centrar progresivamente el análisis donde se concentran los factores de seguridad más bajos.
3. Se realizó la búsqueda de fallas circulares en todos los casos salvo en el perfil A-A'1 por tener una superficie de falla evidente no circular.
4. El número de dovelas fue de 50, tolerancia 0.005, iteración máx. 70, superficies 4500.

Con el software RS2 se tuvieron los siguientes comentarios:

1. La geometría pulida de los perfiles fue ingresada del software Slide v7 ya que en algunos casos se presentaban errores de validación de geometría.
2. La malla fue de 6 nodos y 100 de precisión de grilla, tolerancia 0.001, iteración máx. 500, búsqueda activada de SRF, tensión de campo = gravedad con topografía actual, materiales plásticos.

Con el software FLAC v8 se tuvieron las siguientes anotaciones.

1. Se realizó una limpieza de geometría continua hasta obtener una geometría y grilla válidas y óptimas para el análisis, al ser un programa demo se presentaba restricción en la densidad de la grilla, pero fue suficiente para un resultado deseado.
2. Para los perfiles C-C'2 y D-D'2 se utilizó el software FLAC SLOPE v8 (complemento de FLAC v8) por ser de mayor versatilidad en el caso de taludes.

Los resultados correlativos para los 3 softwares se encuentran en los Anexos H, I y J, resumiéndose en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados del análisis de seguridad global (mismas condiciones para todos los softwares).

PERF.	CONDICIÓN	SLIDE v7					RS2 v9	FLAC v8
		SPENCER	CORP2	LOWE	GLE	SARMA		
A-A' 1	Normales	1.145	1.148	1.144	1.139	1.145	1.051	1.02
	Sis Máx	0.745	0.737	0.734	0.738	0.745	0.574	0.62
	Sat Med	0.849	0.853	0.851	0.838	0.855	0.782	0.65
	Sis Máx y Sat Med	0.55	0.542	0.538	0.535	0.552	0.373	0.45
A-A' 2	Normales	1.472	1.477	1.476	1.476	1.472	1.47	1.33
	Sis Máx	0.922	0.924	0.923	0.922	0.922	0.866	0.76
	Sat Med	1.21	1.21	1.208	1.21	1.204	1.204	1.01
	Sat Tot	0.828	0.833	0.831	0.833	0.828	0.78	0.73
	Sis Máx y Sat Med	0.76	0.759	0.756	0.76	0.763	0.249	0.29
B-B' 1	Normales	1.131	1.129	1.129	1.131	1.124	1.097	1.05
	Sis Máx	0.675	0.675	0.675	0.675	0.674	0.577	0.46
	Sat Med	0.919	0.92	0.92	0.919	0.918	0.816	0.99
	Sis Máx y Sat Med	0.546	0.546	0.546	0.546	0.545	0.397	0.32
B-B' 2	Normales	1.845	1.845	1.846	1.846	1.842	1.855	1.77
	Sis Máx	1.103	1.101	1.1	1.103	1.1	1.019	1.02
	Sat Med	1.565	1.565	1.565	1.565	1.562	1.635	1.36
	Sat Tot	1.103	1.102	1.1	1.104	1.111	1.112	1.17
	Sis Máx y Sat Med	0.923	0.924	0.924	0.923	0.923	0.802	0.99
C-C' 1	Normales	2.622	2.634	2.626	2.622	2.622	2.654	2.54
	Sis Máx	1.461	1.46	1.459	1.462	1.459	1.391	1.29
	Sat Tot	1.553	1.553	1.551	1.554	1.598	1.408	1.88
	Sis Máx y Sat Tot	0.883	0.882	0.882	0.883	0.879	0.696	0.62
C-C' 2	Normales	9.588	9.162	9.412	9.265	8.77	9.447	10.1
	Sis Máx	5.244	5.165	4.827	5.227	5.22	6.099	5.29
	Sat Tot	7.382	7.516	7.431	7.324	7.173	8.657	7.11
	Sis Máx y Sat Tot	4.011	4.055	3.683	3.99	4.022	4.545	3.56
D-D' 1	Normales	4.137	4.231	4.142	4.134	4.129	4.094	4.34
	Sis Máx	2.384	2.285	2.245	2.369	2.376	2.258	2.84
	Sat Tot	2.666	2.276	2.621	2.653	2.715	2.522	2.93
	Sis Máx y Sat Tot	1.617	1.535	1.5	1.585	1.649	1.411	2.44
D-D' 2	Normales	11.977	12.135	12.033	11.968	11.952	11.78	12.72
	Sis Máx	6.429	6.222	5.95	6.407	6.406	6.296	6.57
	Sat Tot	11.977	12.135	12.033	11.968	11.952	8.142	8.51
	Sis Máx y Sat Tot	6.429	6.22	5.95	6.407	6.406	4.325	4.13

En la Figura 23 se muestran los resultados de la Tabla 19 en intervalos tradicionales de FS, a una precisión centesimal y promediando los resultados del software Slide, se concluye en:

1. En todas las condiciones normales los 3 softwares coinciden al 100%.
2. El software Slide es el que genera menos discrepancias (1) y por FS sobre-estimado. RS2 es el que genera más discrepancias (4), siempre frente a saturación y por un FS sub-estimado. FLAC genera 2 discrepancias y en ambos casos por FS sub-estimado.
3. En el análisis de taludes (perfiles C-C'2 y D-D'2) los 3 softwares coinciden al 100%.
4. Los perfiles donde los materiales críticos son suelos (A-A'1, A-A'2, B-B'1, B-B'2 y C-C'1) muestran inestabilidad en almenemos una condición. Mientras donde se analizó macizos rocosos (C-C'2, D-D'1 y D-D'2), son estables en toda condición.

PERF.	CONDICIÓN	SLIDE V7	RS2 V9	FLAC V8	REAL	FS		
						C	De	A
A-A'1	Normales	1.14	1.05	1.02		0.00	0.90	Inestable absoluto
	Sis Máx	0.74	0.57	0.62		0.90	1.00	Inestable relativo
	Sat Med	0.85	0.78	0.65		1.00	1.30	Estable relativo
	Sis Máx y Sat Med	0.54	0.37	0.45		1.30	1.50	Estable temporalmente
A-A'2	Normales	1.47	1.47	1.33		1.50	3.00	Estable permanentemente
	Sis Máx	0.92	0.87	0.76		3.00	15.00	Estable absoluto
	Sat Med	1.21	1.20	1.01				
	Sat Tot	0.83	0.78	0.73				
B-B'1	Normales	1.13	1.10	1.05				
	Sis Máx	0.67	0.58	0.46				
	Sat Med	0.92	0.82	0.99				
	Sis Máx y Sat Med	0.55	0.40	0.32				
B-B'2	Normales	1.84	1.86	1.77				
	Sis Máx	1.10	1.02	1.02				
	Sat Med	1.56	1.64	1.36				
	Sat Tot	1.10	1.11	1.17				
C-C'1	Normales	2.63	2.65	2.54				
	Sis Máx	1.46	1.39	1.29				
	Sat Tot	1.56	1.41	1.88				
	Sis Máx y Sat Tot	0.88	0.70	0.62				
C-C'2	Normales	9.24	9.45	10.10				
	Sis Máx	5.14	6.10	5.29				
	Sat Tot	7.37	8.66	7.11				
	Sis Máx y Sat Tot	3.95	4.55	3.56				
D-D'1	Normales	4.15	4.09	4.34				
	Sis Máx	2.33	2.26	2.84				
	Sat Tot	2.59	2.52	2.93				
	Sis Máx y Sat Tot	1.58	1.41	2.44				
D-D'2	Normales	12.01	11.78	12.72				
	Sis Máx	6.28	6.30	6.57				
	Sat Tot	8.28	8.14	8.51				
	Sis Máx y Sat Tot	4.46	4.33	4.13				

C	Soft Discrepante	Cant D	%
	NINGUNO	27	79.41
	SLIDE	1	2.94
	RS2	4	11.76
	FLAC	2	5.88

Figura 23. Coincidencias y discrepancias de los resultados con intervalos tradicionales.

En la Figura 24 se muestran las variaciones en los FS de la Tabla 19 a una precisión de 0.001, a partir de la cual se concluye lo siguiente:

1. La variación de todos los softwares es baja (0.013), pero su VPA es alta (0.250).
2. Los softwares que más discrepan en VPA son RS2 y FLAC (0.313), seguido de Slide y FLAC (0.254) y los que más convergen son Slide y RS2 (0.182).
3. En perfiles con suelos el VPA entre los tres softwares es bajo (0.127), y en los perfiles de rocas es alto (0.475).
4. En condiciones normales o de sismicidad máxima el VPA es bajo (0.216, 0.219 respectivamente), mientras en saturación total y/o con sismicidad máxima es alto (0.329 y 0.435 respectivamente).

PERF.	CONDICIÓN	SLIDE V7	RS2 V9	FLAC V8	SLIDE - RS2	SLIDE - FLAC	RS2 - FLAC	VPA				
A-A'1	Normales	1.144	1.051	1.020	0.093	0.124	0.031	0.083	RANGOS DE FS	C	DE	A
	Sis Máx	0.740	0.574	0.620	0.166	0.120	-0.046	0.111			0.00	0.90
	Sat Med	0.849	0.782	0.650	0.067	0.199	0.132	0.133			0.90	1.00
	Sis Máx y Sat Med	0.543	0.373	0.450	0.170	0.093	-0.077	0.113			1.00	1.30
A-A'2	Normales	1.475	1.470	1.330	0.005	0.145	0.140	0.097			1.30	1.50
	Sis Máx	0.923	0.866	0.760	0.057	0.163	0.106	0.109			1.50	3.00
	Sat Med	1.208	1.204	1.010	0.004	0.198	0.194	0.132			3.00	15.00
	Sat Tot	0.831	0.780	0.730	0.051	0.101	0.050	0.067				
B-B'1	Sis Máx y Sat Med	0.760	0.249	0.290	0.511	0.470	-0.041	0.341	DIF ABS (RANG)	C	DE	A
	Normales	1.129	1.097	1.050	0.032	0.079	0.047	0.053		1	0.000	0.030
	Sis Máx	0.675	0.577	0.460	0.098	0.215	0.117	0.143		2	0.030	0.100
	Sat Med	0.919	0.816	0.990	0.103	-0.071	-0.174	0.116		3	0.100	0.300
B-B'2	Sis Máx y Sat Med	0.546	0.397	0.320	0.149	0.226	0.077	0.151	4	0.300	0.700	
	Normales	1.845	1.855	1.770	-0.010	0.075	0.085	0.057	5	0.700	2.000	
	Sis Máx	1.101	1.019	1.020	0.082	0.081	-0.001	0.055				
	Sat Med	1.564	1.635	1.360	-0.071	0.204	0.275	0.183				
C-C'1	Sat Tot	1.104	1.112	1.170	-0.008	-0.066	-0.058	0.044				
	Sis Máx y Sat Med	0.923	0.802	0.990	0.121	-0.067	-0.188	0.125				
	Normales	2.625	2.654	2.540	-0.029	0.085	0.114	0.076				
	Sis Máx	1.460	1.391	1.290	0.069	0.170	0.101	0.113				
C-C'2	Sat Tot	1.562	1.408	1.880	0.154	-0.318	-0.472	0.315				
	Sis Máx y Sat Tot	0.882	0.696	0.620	0.186	0.262	0.076	0.175				
	Normales	9.239	9.447	10.100	-0.208	-0.861	-0.653	0.574				
	Sis Máx	5.137	6.099	5.290	-0.962	-0.153	0.809	0.641				
D-D'1	Sat Tot	7.365	8.657	7.110	-1.292	0.255	1.547	1.031				
	Sis Máx y Sat Tot	3.952	4.545	3.560	-0.593	0.392	0.985	0.657				
	Normales	4.155	4.094	4.340	0.061	-0.185	-0.246	0.164				
	Sis Máx	2.332	2.258	2.840	0.074	-0.508	-0.582	0.388				
D-D'2	Sat Tot	2.586	2.522	2.930	0.064	-0.344	-0.408	0.272				
	Sis Máx y Sat Tot	1.577	1.411	2.440	0.166	-0.863	-1.029	0.686				
	Normales	12.013	11.780	12.720	0.233	-0.707	-0.940	0.627				
	Sis Máx	6.283	6.296	6.570	-0.013	-0.287	-0.274	0.191				
D-D'2	Sat Tot	8.283	8.142	8.510	0.141	-0.227	-0.368	0.245				
	Sis Máx y Sat Tot	4.463	4.325	4.130	0.138	0.333	0.195	0.222				
VP					-0.006	-0.020	-0.014	0.013				
VPA					0.182	0.254	0.313	0.250				
VPA SUELOS A-A' (1 Y 2), B-B' (1 Y 2) Y C-C'1					0.102	0.161	0.118	0.127				
VPA ROCAS C-C'2, D-D' (1 Y 2)					0.329	0.426	0.670	0.475				
VPA TODOS LOS PERFILES COND NORM					0.084	0.283	0.282	0.216				
VPA TODOS LOS PERFILES SIS MAX					0.190	0.212	0.255	0.219				
VPA A-A'2, B-B'2, C-C'(1 Y 2), D-D'(1 Y 2) SAT TOT					0.285	0.219	0.484	0.329				
VPA C-C'(1 Y 2), D-D'(1 Y 2) SIS MAX Y SAT TOT					0.271	0.463	0.571	0.435				

Figura 24. Variaciones en los factores de seguridad encontrados. V=variación, P=promedio, A=absoluto.

A diferencia de los rangos anteriores, discutibles frente a diversos criterios y condiciones, y que podría cambiar los resultados concluidos; cuando comparamos los resultados en el límite de estabilidad (FS=1) todos los programas coinciden, como se aprecia en la Figura 25, tanto en las laderas como en los taludes y en cualquier condición de análisis.

PERF.	CONDICIÓN	SLIDE	RS2	FLAC	FS			
		V7	V9	V8	C	De	A	Estado
A-A'1	Normales	1.14	1.05	1.02				
	Sis Máx	0.74	0.57	0.62	0.00	1.00		Instable
	Sat Med	0.85	0.78	0.65	1.00	15.00		Estable
	Sis Máx y Sat Med	0.54	0.37	0.45				
A-A'2	Normales	1.47	1.47	1.33				
	Sis Máx	0.92	0.87	0.76				
	Sat Med	1.21	1.2	1.01				
	Sat Tot	0.83	0.78	0.73				
	Sis Máx y Sat Med	0.76	0.25	0.29				
B-B'1	Normales	1.13	1.1	1.05				
	Sis Máx	0.67	0.58	0.46				
	Sat Med	0.92	0.82	0.99				
	Sis Máx y Sat Med	0.55	0.4	0.32				
B-B'2	Normales	1.84	1.86	1.77				
	Sis Máx	1.1	1.02	1.02				
	Sat Med	1.56	1.64	1.36				
	Sat Tot	1.1	1.11	1.17				
	Sis Máx y Sat Med	0.92	0.8	0.99				
C-C'1	Normales	2.63	2.65	2.54				
	Sis Máx	1.46	1.39	1.29				
	Sat Tot	1.56	1.41	1.88				
	Sis Máx y Sat Tot	0.88	0.7	0.62				
C-C'2	Normales	9.24	9.45	10.1				
	Sis Máx	5.14	6.1	5.29				
	Sat Tot	7.37	8.66	7.11				
	Sis Máx y Sat Tot	3.95	4.55	3.56				
D-D'1	Normales	4.15	4.09	4.34				
	Sis Máx	2.33	2.26	2.84				
	Sat Tot	2.59	2.52	2.93				
	Sis Máx y Sat Tot	1.58	1.41	2.44				
D-D'2	Normales	12.01	11.78	12.72				
	Sis Máx	6.28	6.3	6.57				
	Sat Tot	8.28	8.14	8.51				
	Sis Máx y Sat Tot	4.46	4.33	4.13				

C	DISC	TOT	%
0		34	100.00

Figura 25. Coincidencias y discrepancias de los resultados en el límite de estabilidad.

#### 4.1.2 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DEL SOFTWARE SLIDE

Slide v7 al ser un software de equilibrio límite, cuenta con diversos métodos de análisis desde su enfoque en las dovelas, hasta tipos superficies de rotura, métodos de búsqueda de fallas, inclinación de las dovelas, entre otros más.

Se utilizó el perfil A-A'1 para un análisis comparativo de 4 métodos de análisis de superficies de fallas, de entre los muchos que hay, los resultados se muestran en el Anexo H, Análisis Slide N° 2-7 y se resume en la Tabla 20.

Tabla 20. Comparación de los resultados del análisis de perfil A-A'1 con el software Slide v7 bajo sus métodos de superficies de falla y de dovelas. Sombreado los valores con mayor coincidencia en cada secuencia.

TIPO DE FALLA	MÉTODO										
	Ord/Fell	Bish sim	Jan sim	Jan corr	Spc	Corp Eng 1	Corp Eng 2	Lowe-Kar	GLE/Mr-Pr	Sarm V	Sarm No V
Circular (milés.)	1.133	1.156	1.131	1.168	1.158	1.156	1.158	1.156	1.159	1.153	1.157
Circular (cent.)	1.13	1.16	1.13	1.17	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.15	1.16
Circular (dec.)	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
No circ. (milés.)	1.07	1.157	1.116	1.155	1.145	1.147	1.148	1.144	1.139	1.145	1.152
No circ. (cent.)	1.07	1.16	1.12	1.16	1.15	1.15	1.15	1.14	1.14	1.15	1.15
No circ. (dec.)	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.2

De la tabla anterior, se concluye lo siguiente:

1. Los factores de seguridad más bajos los da el criterio de Fellenius.
2. Los factores de seguridad más altos los da el criterio de Janbu corregido.
3. Los resultados a una precisión milesimal no muestran muchas coincidencias.
4. A una precisión centesimal los métodos que logran coincidencias tanto en fallas circulares y no circulares son: Spencer, Corp Eng1, Corp Eng 2 y Sarma no vertical.
5. A una precisión decimal los métodos que se suman a las coincidencias son: Bishop simplificado, Janbu corregido y Sarma vertical.
6. Las fallas circulares son las que generan resultados más correlacionables.
7. El método de Bishop simplificado, a pesar de su antigüedad, genera coincidencias destacables con los métodos más modernos.

#### 4.1.3 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

El análisis probabilístico en el análisis de estabilidad de taludes es una herramienta muy necesaria cuando se tiene gran variabilidad en las propiedades geomecánicas (terrenos muy heterogéneos), este método permite analizar al talud bajo múltiples valores de una o varias propiedades a partir de una variabilidad y condiciones estadísticas.

Para el análisis probabilístico comparativo entre los 3 softwares, se utilizó el perfil C-C'2 (talud) bajo condiciones normales. La variable utilizada para la variabilidad fue la resistencia a la compresión uniaxial de la formación Inca (Ki-in) que es la que compone enteramente al talud, siendo su valor estándar 25MPa, se aplicó una desviación estándar de 2MPa y un real mínimo y máximo de 4MPa, el número de muestras fue de 100.

En el software Slide v7, el análisis probabilístico se puede aplicar a la falla crítica o a todo el talud y se realiza dentro del mismo archivo, para esta investigación realizo solo a la falla crítica, los resultados se muestran en el Anexo H, Análisis Slide N°33-37 y se resume en la Tabla 21:

*Tabla 21. Resultados del análisis probabilístico con el software Slide v7 sobre el perfil C-C'2.*

Método	Sarma
FS determinístico (normal)	8.77
FS promedio (de todas las muestras)	8.629
PF (probabilidad de falla)	0%
RI (normal)	19.867
RI (lognormal)	48.43

En el software RS2 se tiene que crear nuevos archivos de análisis para cada valor estadístico de la muestra para el análisis probabilístico, lo que incrementa enormemente el tiempo de análisis, ya que se tiene que analizar cada talud en su totalidad para cada muestra. Los resultados se muestran en el Anexo I, Análisis RS2 N° 29 y 30 y se resume en la Tabla 22.

*Tabla 22. Resultados del análisis probabilístico con el software RS2 v9 sobre el perfil C-C'2.*

FS determinístico (normal)	9.447
FS determinístico (de todas las muestras)	11.13
Des. Est. del FS	0.4379
PF (probabilidad de falla)	0%

El software FLAC v8 y FLAC SLOPE v8 no cuenta con un método para incluir el análisis probabilístico dentro del archivo de trabajo como en el software Slide v7 ni crear múltiples archivos individuales para cada muestra como en el software RS2, por lo que se procedió a analizar el talud bajo la resistencia mínima dada en el análisis, con una resistencia uniaxial de 21MPa. El resultado se muestra en el Anexo J, Análisis FLAC N° 29 y 30 y se resume en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados del análisis probabilístico con el software FLAC SLOPE v8 sobre el perfil C-C'2.

FS normal (sigci=25MPa)	9.57
FS mínimo (sigci=21MPa)	9.24
PF (probabilidad de falla)	0%

Las conclusiones del presente análisis se muestran en la Tabla 24:

Tabla 24. Conclusión del análisis probabilístico con los tres softwares comparados.

SOFT.	FS NORMAL	FS DETER.	PF %	GENERACIÓN DE MUESTRAS	VELOCIDAD DEL ANÁLISIS
Slide v7	8.77	8.629	0	En un solo archivo	Rápida al aplicarse solo a la superficie de falla crítica
RS2 v9	9.447	11.13	0	En múltiples archivos	Lenta, tiene que evaluar cada talud en su totalidad
FLAC v8	9.57	No calculado	0	El usuario tiene que generar sus muestras en diversos archivos	Muy lenta, se tiene que crear y configurar los taludes manualmente y analizar cada talud en su totalidad

#### 4.1.4 ANÁLISIS CON DISEÑO ESTÁNDAR

Existen en la actualidad diseños estándar como es el caso del Eurocode 7, que establece la utilización de factores de seguridad parciales que generaran un factor de seguridad sobre-diseñado. A pesar de que en RS2 y FLAC se pueden realizar análisis dinámicos (verdadero análisis sísmico de deformaciones, aunque no genera un FS), en dichos softwares se puede ingresar directamente valores de diseño estándar para el cálculo del factor de seguridad.

Para el análisis estándar (Eurocode 7) y compararlo con un análisis común, se ha utilizado el perfil C-C'2 bajo condiciones sísmicas extremas con del software Slide v7, los resultados se muestran en el Anexo H, Análisis Slide N° 38 y 39 y se resumen en la Tabla 25.

Tabla 25. Comparación de resultados con condiciones de sismicidad máxima normal y con Eurocode 7 en el perfil C-C'2 con el software Slide v7.

CONDICIÓN	MÉTODO				
	Spencer	Corp of Eng. 2	Lowe-Kar	GLE/ Morg-Price	Sarma
Sis. Máx.	5.244	5.165	4.827	5.227	5.220
Sis. máx. con Eurocode 7	4.999	4.672	4.244	4.853	4.955
Variación	0.245	0.493	0.583	0.374	0.265
Porc de var %	4.67	9.55	12.08	7.16	5.08

De la tabla anterior se puede concluir que las variables introducidas durante el análisis con el estándar Eurocode 7 afectan al factor de seguridad final de forma notable.

## 4.2 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

### 4.2.1 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

Para el cálculo de la matriz de coeficientes de Pearson (medida de relación lineal entre variables independiente de la escala de medida) se ha utilizado la Tabla 19, en dos condiciones, precisión milesimal (0.001) y centesimal (0.01), tanto para la data de entrada como de salida. Los resultados se muestran en la Figura 26.

a) **COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON (PRECISIÓN DE DATA A 0.001)**

SLIDE v7	Spencer								
	C de Ing. 2	0.999							
	Lowe-Kar	0.999	0.999						
	GLE/Morg-P	1.000	0.999	0.999					
	Sarma	0.999	0.999	0.998	1.000				
	Prom	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999			
	RS2 v9	0.995	0.995	0.993	0.995	0.994	0.995		
	FLAC v8	0.996	0.994	0.996	0.996	0.995	0.995	0.987	
	Spencer	C de Ing. 2	Lowe-Kar	GLE/Morg-P	Sarma	Prom	RS2 v9	FLAC v8	
SLIDE v7									

b) **COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON (PRECISIÓN DE DATA A 0.01)**

SLIDE v7	Spencer								
	C de Ing. 2	1.00							
	Lowe-Kar	1.00	1.00						
	GLE/Morg-P	1.00	1.00	1.00					
	Sarma	1.00	1.00	1.00	1.00				
	Prom	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			
	RS2 v9	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99		
	FLAC v8	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99	
	Spencer	C de Ing. 2	Lowe-Kar	GLE/Morg-P	Sarma	Prom	RS2 v9	FLAC v8	
SLIDE v7									

Figura 26. Matriz de Pearson para los datos de la Figura 23 a una precisión de 0.001 (a) y 0.01 (b).

Se puede concluir en:

1. A una precisión de 0.001 se presentan 5 correlaciones positivas perfectas, todas en el caso de los métodos de análisis del software Slide v7.
2. A una precisión de 0.01 se presentan 19 correlaciones positivas perfectas, entre todos los datos del software Slide v7 y entre 4 relaciones entre Slide v7 y FLAC V8.
3. Tanto a una precisión de 0.001 como 0.01, el software RS2 presenta correlaciones positivas altas, mas no perfectas con los demás softwares.
4. En todos los casos, se muestra una correlación positiva alta muy importante ( $>0.987$ ) lo que demuestra que los 3 Softwares generan factores de seguridad muy similares.

## 4.2.1 RELACIÓN LINEAL DE LOS RESULTADOS

En la Figura 27, se presentan gráficos lineales para los resultados de la Figura 23.

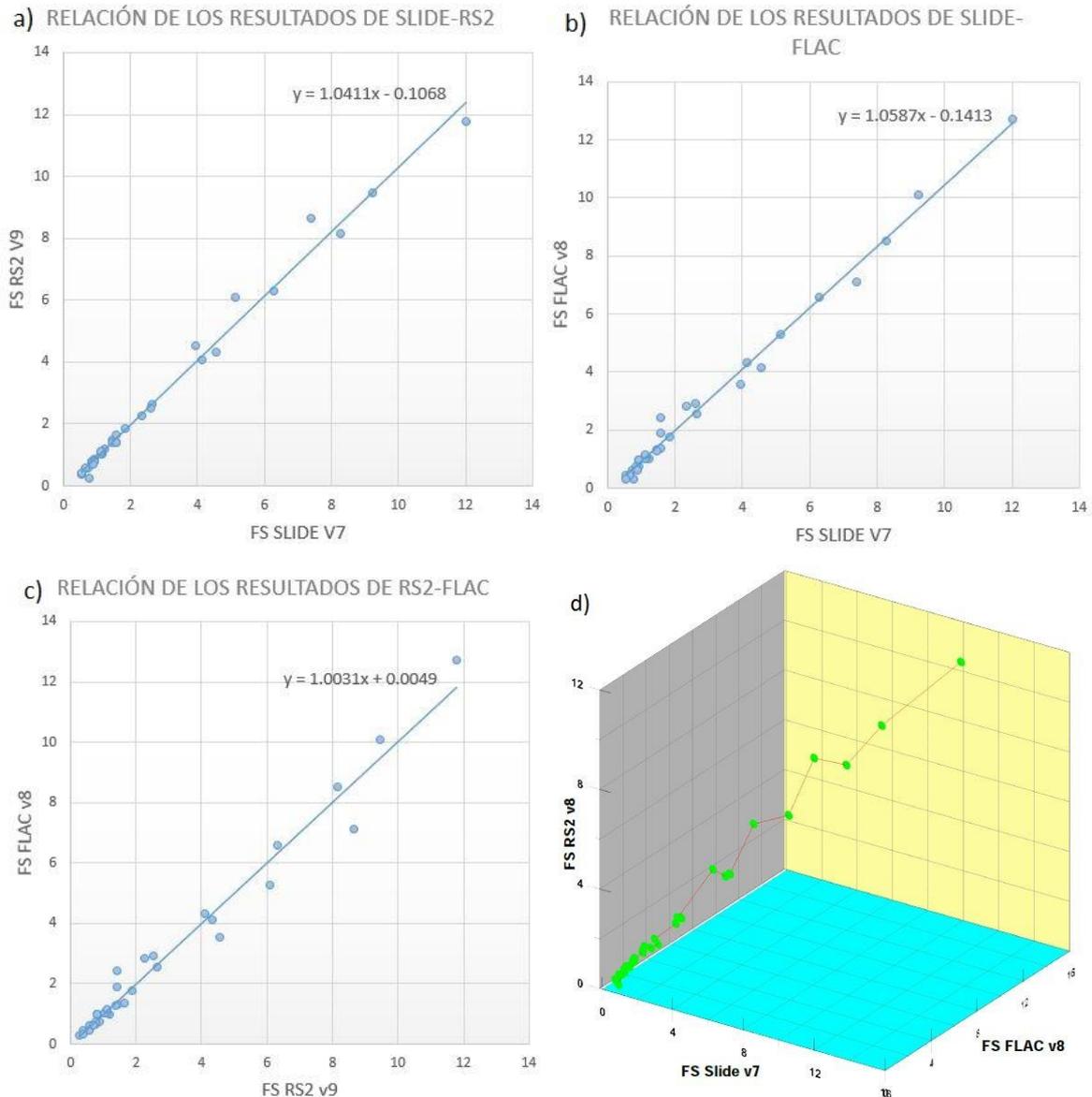


Figura 27. Relación Lineal de los FS obtenidos: Slide v7-RS2 (a), Slide v7-FLAC (b), RS2-FLAC v8 (c) y gráfico 3D de los FS obtenidos.

Se puede observar que los datos de FS cercanos a 1 se interrelacionan mejor que los FS altos, esto se debe a la magnitud misma del análisis, además se puede ver gráficamente que los FS obtenidos se relacionan en buena medida entre los 3 softwares.

Además, se discierne que se puede realizar una línea de tendencia con una relación x/y muy cercana a 1, observado en la Figura 27, gráficos a-c.

### 4.3 COMPARACIÓN DE LOS SOFTWARES ANALIZADOS

En la Tabla 26, se resume los resultados finales alcanzados por la presente investigación con relación a los softwares comparados.

Tabla 26. Comparación de las características analizadas de los softwares.

CARACTERÍSTICA	SOFTWARES UTILIZADOS			
	SLIDE V7	RS2 v9	FLAC v8	FLAC SLOPE V8
Método	Equilibrio límite	Elementos finitos	Diferencias finitas	
Materiales	Suelos (Mohr-Coulomb) y macizos rocosos de baja calidad (Hoek-Brown)			
Aplicación recomendable	Laderas y Taludes		Laderas	Taludes
Dibujo de grilla	Importación rápida y auto-limpieza de la geometría	Importación rápida y limpieza manual de la geometría	Importación lenta y requiere refinar la geometría	Interfaz rápida de dibujo de la geometría.
Inserción de propiedades	Rápida		Lenta	Rápida
Precisión del análisis	Elegible por el usuario			
Mejor método de búsqueda de la falla crítica	Fallas no circulares (con falla evidente), método de búsqueda "Auto Refine Search", Método de Bishop Simplificado y los métodos más recientes.	Único (Strength Reduction)		
Agua subterránea	Definido por un nivel freático			
Sismicidad	Análisis pseudo-estático			
Análisis de deformaciones	No	Si		
Estándares de diseño	Si	No		
Validez del FS	En condiciones normales totalmente válida, requiera análisis detenido bajo condiciones de sismicidad y/o agua subterránea			
Análisis probabilístico	Rápido	Lento	Ausente	
Ventajas	- Rapidez del análisis - Posibilidad de analizar múltiples círculos de falla a la vez.	- Un solo método de análisis - Análisis de variables de deformación - Mayor discretización del talud y/o ladera	- Rapidez del análisis - Diseño rápido del talud	
Desventajas	- No incluye variables de deformación - Requiere un criterio refinado para la selección del método correcto	- FS sub-estimado con agua subterránea	- Continua invalidez de la geometría y/o grilla	- Solo aplicable a taludes
Personalización de los resultados	Alta: Gráficos, membretes, informes.		Baja, estándares de dibujo pre-establecidos	

Además, la Tabla 27 describe otras características de los softwares que no se han analizado en la presente investigación pero que pueden ayudar a la selección del software indicado para cada necesidad.

Tabla 27. Otras características comparativas entre los softwares analizados.

CARACTERÍSTICA	SOFTWARES UTILIZADOS			
	SLIDE V7	RS2 v9	FLAC v8	FLAC SLOPE V8
Ventajas de licencias para Investigación y educación	Convenio educativo e incluyen todos los softwares de Rocscience para toda una universidad		Descarga de versión libre rápida con restricciones en la densidad de la grilla	
Aplicación	Estructuras superficiales (laderas, taludes, represas, terraplenes, etc)	Estructuras superficiales y subterráneas (tunelería minera y civil), cimentaciones		Taludes
Análisis sísmico	Pseudo-estático, Newmark	Pseudo-estático, dinámico		Pseudo-estático
Agua subterránea	Nivel freático, condiciones drenadas y no drenadas, agua transitoria	Nivel freático, condiciones drenadas y no drenadas, agua transitoria		Nivel freático
Cargas	Si			
Soportes lineales (anclajes, soil-nailing, geo-membranas, etc.)	Si			
Soportes geométricos (Muros, gaviones, etc.)	Indirectamente			No
Análisis de tensiones	No	Si		
Análisis de deformaciones	No	Si		
Zonificación del FS	Si (coloración de los círculos de falla)	No	Si	No
Análisis de creep	No		Si	No
Análisis térmico	No		Si	No
Análisis multi-pasos	Si			No
Retro-análisis	Si	No		
Discontinuidades	No	Si		No

#### 4.4 CONTRASTACIÓN CON LA HIPÓTESIS

Se ha demostrado con la investigación, en el caso del análisis de laderas y taludes en suelos y macizos rocosos de mala calidad, las tres metodologías: Equilibrio límite (Software Slide v7), Elementos Finitos (Software RS2 v9) y Diferencias Finitas (Software FLAC v8) muestran factores de seguridad similares y válidos. Sin embargo, para otras aplicaciones (análisis dinámico y deformaciones) algunos métodos tienen mayores ventajas (Tabla 26 y Tabla 27), tomando en cuenta todas estas variables a la hora de elegir el método indicado para un análisis en específico; validando así la hipótesis inicial.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- ✓ La zona de Calispuquio, al sur-oeste de la ciudad de Cajamarca está constituido por suelos (depósitos aluviales, coluviales, deluviales y coluvio-aluviales) y macizos rocos de mala calidad (Formaciones Farrat, Inca, Chúlec y Porculla), materiales homogéneos y analizables con los métodos de Equilibrio límite (Software Slide v7), Elementos finitos (Software RS2 v9) y Diferencias finitas (Software FLAC v8).
- ✓ El software Slide v7 destaca por su velocidad de análisis y confiabilidad de los resultados en el análisis de laderas y taludes, requiere entrenamiento para poder elegir los métodos de análisis adecuados (ya que cuenta con muchos y variados).
- ✓ El software RS2 v9 puede analizar taludes y laderas de forma rápida, teniendo cuidado con el análisis de aguas subterráneas, ya que se generan factores de seguridad sub-estimados en relación con los otros dos softwares.
- ✓ El software FLAC v8 muestra resultados válidos en cualquier condición, pero requiere realizar optimizaciones de geometría y grillas para que sean válidas, en su complemento FLAC SLOPE esta dificultad está ausente y se puede ingresar datos más rápido, pero solo acepta geometrías de taludes.
- ✓ La variación promedio (VP) de FS es baja entre los tres softwares (0.013), pero la variación promedio absoluta (VPA) es alta (0.250); los softwares que más discrepan en VPA son RS2 y FLAC (0.313), seguido de Slide y FLAC (0.254) y los que más convergen son Slide y RS2 (0.182); además, en perfiles con suelos el VPA entre los tres softwares es bajo (0.127), y en los perfiles de rocas es alto (0.475).

## 5.2 RECOMENDACIONES

- ✓ Utilizar indistintamente los métodos de Equilibrio límite (Software Slide v7), Elementos Finitos (Software RS2 v9) y Diferencias Finitas (Software FLAC v8) en condiciones normales o de sismicidad máxima en laderas y taludes de suelos y macizos rocosos de mala calidad (comportamiento homogéneo); teniendo cuidado en el análisis con agua subterránea y/o con sismicidad máxima.
- ✓ Utilizar datos de ensayos geomecánicos como parámetros de entrada en los softwares, si no se cuenta con los mismos se puede utilizar datos documentados (bibliotecas) como los del software RocData pero solo en diseños preliminares.
- ✓ Estudiar los resultados de los softwares Slide v7, RS2 v9 y FLAC v8 frente a soportes y cargas dinámicas para complementar este enfoque comparativo.
- ✓ Tomar las medidas de estabilización más adecuadas para mitigar los peligros de movimientos en masa en las laderas que tienen como material crítico a suelos de la localidad de Calispuquio ya que presentan inestabilidades frente a condiciones de sismicidad y agua subterránea.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications* (illustrate). NY, USA: John Wiley & Sons.
- Bishop, A. W. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Geotechnique*, 5(1).
- Bobet, A. (2010). Numerical Methods in Geomechanics. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 35(1B), 27–48.
- Deere, D. (1963). Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1(1), 16–22.
- Deere, D. (1967). Design of Surfaces and Near-Surface Construction in Rock. *Failure and Breakage of Rock*, 1(1), 237–302.
- Deere, D. U. (1968). Geological considerations. In *Rock Mechanics in Engineering Practice* (pp. 1–20). London, UK: Wiley.
- Eberhardt, E. (2003). *Rock Slope Stability Analysis - Utilization of Advanced Numerical Techniques* (1st ed.). Vancouver, Canadá: University of British Columbia.
- Fellenius, W. (1936). Calculation of the Stability of Earth Dams. In *Second Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams of the world power conference*, Vol 4 (pp. 445–462). Wasington DC, USA.
- Gavilanes, H., & Andrade, B. (2007). *Introducción a la Ingeniería de Túneles* (3rd ed.). (AIME), Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador.
- GEMMA. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas* (1st ed.). Toronto, Canada: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2003). *Ingeniería Geológica* (1st ed.).

Madrid, España: Pearson.

- Hammah, R. E., & Curran, J. H. (2009). It is Better to be Approximately Right than Precisely Wrong: Why Simple Models Work in Mining Geomechanics. In 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4° U.s.-Canada Rock Mechanics Symposium, Asheville, NC June 28-July (p. 8). Asheville, USA: ARMA.
- Highland, L., & Jhonson, M. (2004). Landslide Types and Processes.
- Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock masses. *Géotechnique*, 3(1), 187–223.
- Hoek, E. (2005). Uniaxial compressive strength versus Global strength in the Hoek Brown criterion. Vancouver, Canadá.
- Hoek, E. (2007). Rock Mass Properties. In *Practical Rock Engineering* (2nd ed., pp. 190–236). Toronto, Canada: Rocscience.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. Toronto, Canada.
- Hoek, E., Carter, T. G., & Diederichs, M. S. (2013). Quantification of the Geological Strength Index Chart. In 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium San Francisco, CA, USA, 23-26 June. (p. 9). San Francisco, USA: ARMA.
- Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(1), 203–215.
- Huaripata, M. (2014). Modelo Geodinámico de la Quebrada Cruz Blanca, Microcuenca Cruz Blanca - Los Chilcos. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Itasca. (2016). Itasca Software Products. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group. Retrieved from <http://www.itascacg.com/>
- Janbú, N. (1954). Stability Analysis of Slopes with dimensionless parameters. *Harvard Soil Mechanics Series*, 56(1), 811.
- Jing, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(1), 283–353.
- Lowe, L., & Karafiath, L. (1960). Stability of Earth Dams upon Drawdown. In *Proceedings of the First PanAmerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 537–552). Mexico D.F, Mexico: Mexican Society of Soil Mechanics.

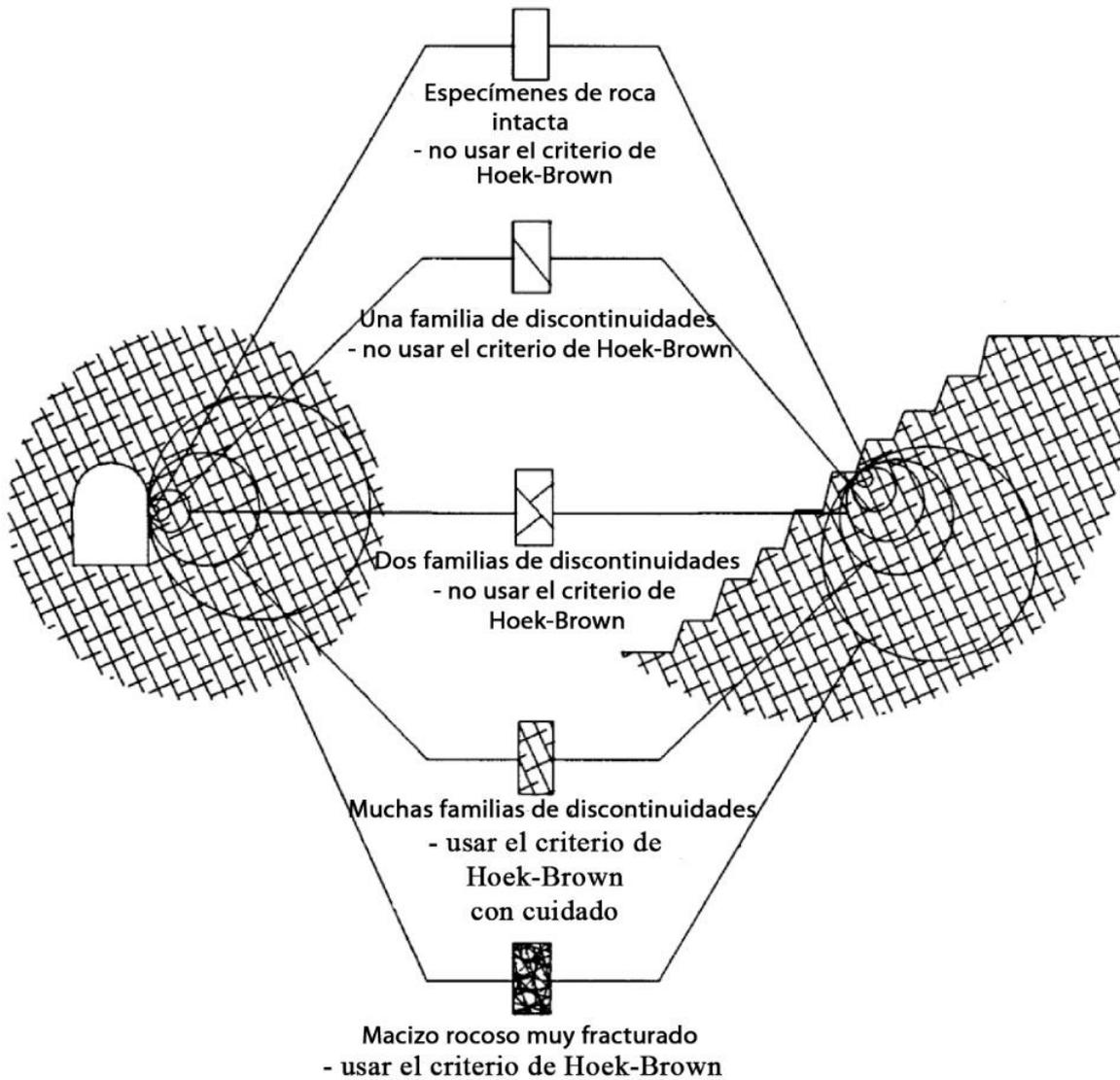
- Marinos, P. G., Marinos, V., & Hoek, E. (2007). The Geological Strength Index (GSI): A characterization Tool for Assessing Engineering Properties for Rock Masses. In *Underground works under special conditions* (Romana, Pe, pp. 13–21). Taylor and Francis.
- Morgenstern, N., & Price, V. (1965). The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79–93.
- Navarro, P. (2007). Mapa Geológico del Cuadrángulo de Cajamarca, Escala 1:50 000 Hoja 15f Cuadrante-I. INGEMMET Lima, Perú.
- Popescu, M., Ugai, K., & Trandafir, A. (2000). Linear versus Non-linear Failure envelopes in LEM and FEM slope stability Analysis. In A. A. Cardiff (Ed.), *8th international symposium on landslides* (pp. 1227–1234). Rotterdam, Países Bajos.
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity Spacings in Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 13(1), 135–148.
- Ramirez, P., & Alejano, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes* (1st ed.). Madrid, España: E.T.S.I Minas (UPM).
- Reyes, L. (1980). *Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba* (1st ed.). Lima, Perú: INGEMMET.
- Rocscience. (2016). Rocscience Software Products. Toronto, Canadá: Rocscience Inc. Retrieved from <https://www.rocscience.com>
- Sarma, S. K. (1973). Stability Analysis of Embankments and Slopes. *Geotechnique*, 23(3), 423–433.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17(1), 11–26.
- Stead, D., & Coggan, J. (2012). Numerical modeling of rock-slope instability. In J. Clague & D. Stead (Eds.), *Landslides: Types, Mechanisms and Modeling* (1st ed., pp. 144–158). Cambridge University Press.
- Stead, D., Eberhardt, E., & Coggan, J. S. (2006). Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques. *Engineering Geology*, 83(1–3), 217–235. JOUR. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.033>

- Suárez, J. (2007). *Deslizamientos - Análisis Geotécnico* (1st ed.). Bogota, Colombia: Erosion.com.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1970). *Stability of Earth and Rock-Fill Dams*. Vicksburg, USA.
- Vallejos, J. A., Brzovic, A., Lopez, C., Bouzeran, L., & Mas Ivars, D. (2013). Application of the Synthetic Rock Mass approach to characterize rock mass behavior at the El Teniente Mine, Chile. In 3rd International FLAC / DEM Symposium, At Hangzhou, China. Paper 7-2 (p. 15). Hangzhou, China.
- Van, P., & Vásárhelyi, B. (2013). Sensitivity analysis of the generalized Hoek-Brown failure criterion. In *Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment* (pp. 835–840). Wroclaw, Poland: ISRM.
- Villota, H. (2005). *Geomorfología Aplicada a Levantamientos Edafológicos y Zonificación Física de Tierras* (2nd ed.). Bogota, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Wikipedia.org. (2016a). Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Retrieved from [https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_Unificado\\_de\\_Clasificación\\_de\\_Suelos](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_Unificado_de_Clasificación_de_Suelos)
- Wikipedia.org. (2016b). Teoría de Mohr-Coulomb. Retrieved from [https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa\\_de\\_Mohr-Coulomb](https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_de_Mohr-Coulomb)
- Zavala, B., & Rosado, M. (2011). *Riesgo Geológico en la Región Cajamarca*. Lima, Perú.

## **ANEXOS**

- A. TABLAS DEL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK-BROWN**
- B. TABLAS DE REGISTRO EN CAMPO**
- C. PLANOS**
- D. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA**
- E. PERFILES**
- F. ANÁLISIS CON EL SOFTWARE ROCDATA V5**
- G. PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LAS UNIDADES INGENIERILES**
- H. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE SLIDE V7**
- I. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE RS2 V9**
- J. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE FLAC V8**

## A.1 DIAGRAMA DE TRANCISIÓN DE UN MACIZO ROCOSO INTACTO A UNO FUERTEMENTE FRACTURADO



## A.2 TABLA DE ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL DE LA ROCA INTACTA $\sigma_{ci}$

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

\*Calidad según Brown (1981).

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

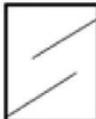
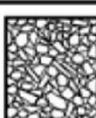
### A.3 TABLA DE ESTIMACIÓN DEL $m_i$

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

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

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

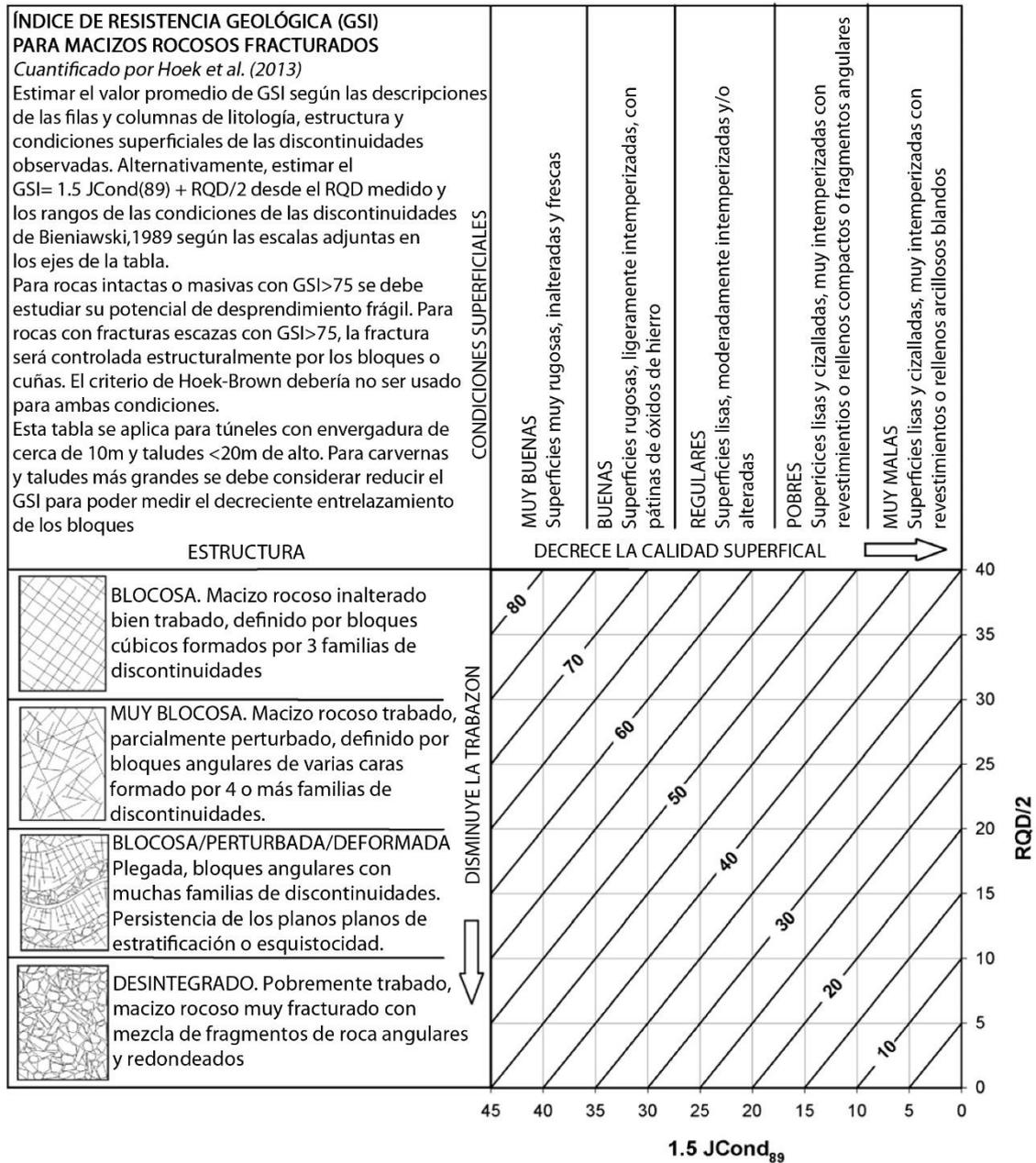
#### A.4 TABLA GSI PARA MACIZOS ROCOSOS HOMOGENEOS

<p><b>ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA ROCAS FRACTURADAS</b> (Hoek y Marinos, 2000)</p> <p>Estimar el valor promedio del GSI para la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades. No intenan ser muy preciso. Citar un rango de 33 a 37 es más realístico que un GSI de 35. Note que las tablas no se aplican a fracturas estructuralmente controladas. Cuando los planos estructurales débiles están en una orientación desfavorable con respecto de la cara excavada, estas dominarán el comportamiento de todo el macizo rocoso. La resistencia de cizalla de las superficies de la roca son propensas a deteriorarse como el resultado de cambios en el contenido de humedad, se reducirá si hay presencia de agua. Cuando se trabaja con rocas en las categorías de débil a muy debil, se debería hacer un desplazamiento hacia la derecha. La presión del agua es tratada con análisis de esfuerzos efectivos.</p>		CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES				
		MUY BUENA Superficies muy rugosas, inalteradas y frescas	BUENA Superficies rugosas, ligeramente intemperizadas, con pátinas de óxidos de hierro	REGULAR Superficies lisas, moderadamente intemperizadas y/o alteradas	MALA Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos compactos o fragmentos angulares	MUY MALA Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos arcillosos blandos
ESTRUCTURA		DECRESE LAS CONDICIONES SUPERFICIALES →				
 <p><b>INTACTA O MASIVA.</b> Espécimen de roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas. Esp. 100cm</p>	150	90			N/A	N/A
 <p><b>BLOCOSA.</b> Macizo rocoso inalterado bien trabado, definido por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades. Esp. 30cm</p>	80	80				
 <p><b>MUY BLOCOSA.</b> Macizo rocoso trabado, parcialmente perturbado, definido por bloques angulares de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades. Esp. 10cm</p>	40	60				
 <p><b>BLOCOSA/PERTURBADA/DEFORMADA</b> Plegada, bloques angulares de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación o esquistocidad. Esp. 3cm</p>	20		50			
 <p><b>DESINTEGRADA.</b> Pobremente trabada, macizo rocoso muy fracturado con mezcla de fragmentos de roca angulares y redondeados Esp. 1cm</p>	5		40		30	
 <p><b>LAMINADA/ CIZALLADA.</b> Ausencia de blocosidad debido a espaciados cercanos de debil esquistocidad o planos de cizalla</p>	2				20	
						10
		N/A	N/A			

## A.5 TABLA GSI PARA MACIZOS ROCOSOS HETEROGÉNEOS

SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)		DECREASE OF THE QUALITY OF DISCONTINUITIES				
VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR		
Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered or oxydised surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments	Very smooth, slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coating or fillings		
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	VII
80	70	60	50	40	30	20
I	II	III	IV	V	VI	

## A.6 TABLA CUANTIFICADA DEL GSI



## A.7 TABLA DE ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE DISTURBACIÓN D

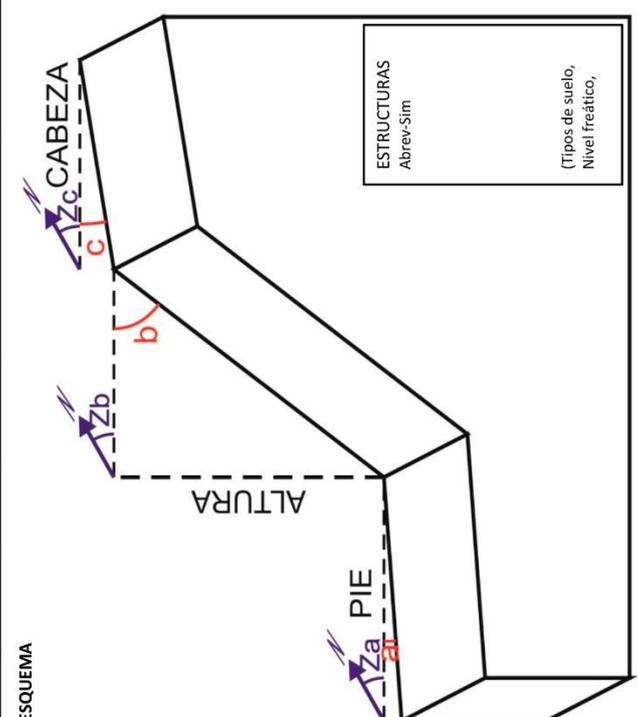
El factor de Disturbación “D” se calcula según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (Hoek, 2007).

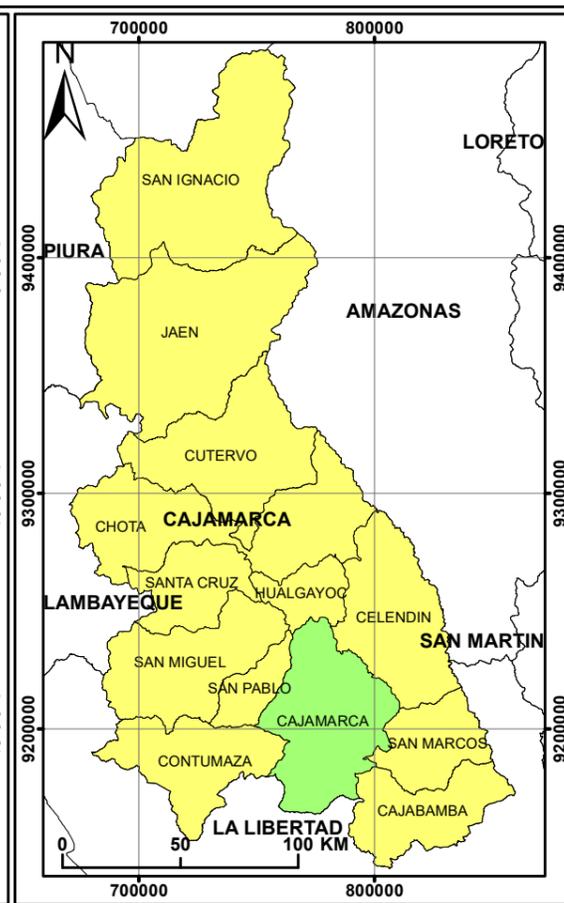
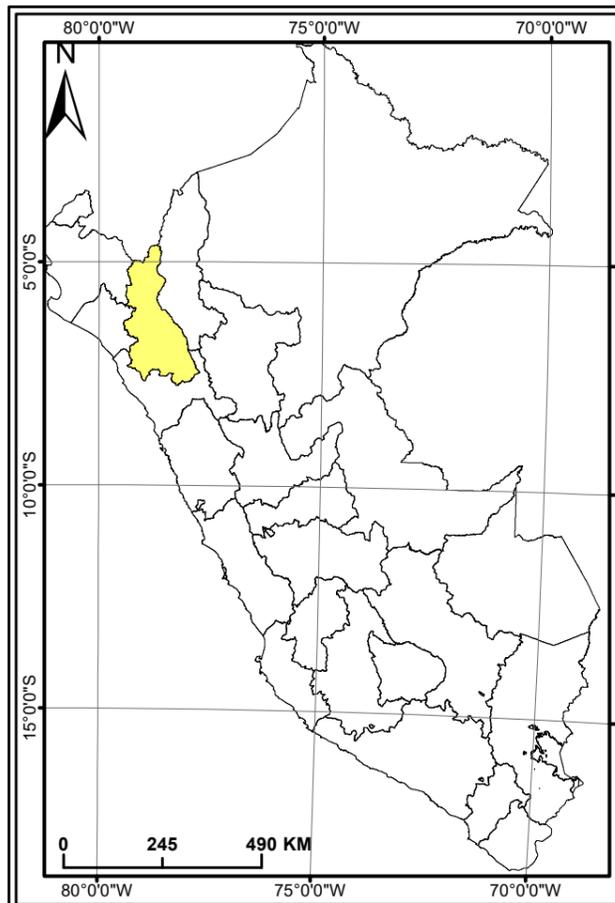
FACTOR DE DISTURBACIÓN "D"			
PARA TÚNELES		Una voladura controlada de excelente calidad o una excavación realizada por una Tunelaroda TBM resultan en una disturbación mínima en el macizo rocoso confinado alrededor del túnel.	D=0
		Una excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladura) resulta en una mínima disturbación alrededor del macizo rocoso.	D=0
		La disturbación puede ser severa cuando los problemas de confinamiento generan un levantamiento del piso, a menos que se ubique un nivel inferior "Invert" temporal como se muestra en la fotografía.	D=0.5 Sin "Invert"
		Una voladura de muy baja calidad en un túnel de roca dura genera daños locales severos que se pueden extender 2 o 3 metros alrededor del macizo rocoso.	D=0.8
PARA TALUDES		Una voladura de pequeña escala en taludes de ingeniería civil provocan daños en macizos de regular calidad, particularmente si se usa una voladura controlada como se muestra en a la izquierda. Sin embargo, el alivio tensional causa alguna disturbación.	Buena Voladura D=0.7
			Mala Voladura D=1.0
		Las grandes minas a cielo abierto sufren disturbaciones significantes debido a las voladuras a gran escala y también por el alivio tensional del movimiento de tierras.	Voladura a Gran Escala D=1.0
En rocas más blandas se puede excavar mediante acarreo por corte y explanación por lo que el grado de daño a las pendientes es menor.		Excavación mecánica D=0.7	

# B.1 REGISTRO DE PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE SUELOS

REGISTRO GEOLÓGICO-GEOTECNICO DE TALUDES POR ESTACION-SUELOS		TESIS:		"Aplicación de los métodos de equilibrio límite, elementos finitos y diferencias finitas en el comportamiento de laderas y taludes, Sector Calispuquio-Cajamarca" - 2016	
CODIGO:		HOJA N°:		SALIDA N°:	
RESPONSABLE:		EJECUTADO POR:		FECHA:	
ESTACION N°:		UBICACION:		ESTACION N°:	
HORA:		UBICACION:		HORA:	
<b>1. DATA GPS</b> SISTEMA: 2.1 Depósito 2.2 Plast 2.3 Comp % ESTE: 1: Eluvial Bloques: NORTE: 2: Deluvial Cantos: COTA: 3: Coluvial Grava: ERROR: 4: Aluvial Arena: MARCA Y SERIE: 5: Fluvial Finos: Mat. Org.:		<b>2. MATERIAL</b> 2.1 Depósito 2.2 Plast 2.3 Comp % 1: Eluvial Bloques: 2: Deluvial Cantos: 3: Coluvial Grava: 4: Aluvial Arena: 5: Fluvial Finos: Mat. Org.:		Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS - ASTM 1985	
<b>3. TALUD</b> Altura (m): Pie (m): Dirección Talud (b) Cabeza (c) Azimut (Z): Dip:		<b>3. TALUD</b> Altura (m): Pie (m): Dirección Talud (b) Cabeza (c) Azimut (Z): Dip:		Taud. Nat. (TN), Vol. o Corte Perf. (VCP) Precorte (P), Vol. Suave (VS), Vol. o Excav. Mec. (VES), Vol. Def. (VD):	
<b>4. ESQUEMA</b> 		<b>4. ESQUEMA</b> 		ESTRUCTURAS Abrev-Sim  (Tipos de suelo, Nivel freático,	
DIVISIONES PRINCIPALES SIMB NOMBRES TÍPICOS GW Gravas limpias Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos. GP (pocos o sin finos) Gravas mal graduadas, mezcla grava-arena, pocos finos o sin finos. GM Gravas con finos Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo. GC (Alta cant. de finos) Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla. SW Arenas limpias Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos. SP (pocos o sin finos) Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos. SM Arenas con finos Arenas limosas, mezclas de arena y limo. SC (Alta cant. de finos) Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla. ML Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. CL Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas. OL Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad. MH Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos. CH Arcillas inorgánicas de plasticidad alta. OH Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada, limos orgánicos. PT* Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.		SUELOS DE GRANO GRUESO: Más de la mitad retenida en el tamiz N 200 SUELOS DE GRANO FINO: Más de la mitad del material pasa por el tamiz de 50 LIMOS Y ARCILLAS: Límite líquido menor de 50 LIMOS Y ARCILLAS: Límite líquido mayor de 50 SUELOS MUY ORGÁNICOS		Observaciones:	
Observaciones:		Observaciones:		Observaciones:	

## B.2 REGISTRO GEOMECÁNICO DE MACIZOS ROCOSOS

REGISTRO GEOLÓGICO-GEOTECNICO DE TALUDES POR ESTACION-ROCAS				"Aplicación de los métodos de equilibrio límite, elementos finitos y diferencias finitas en el comportamiento de laderas y taludes, Sector Calispuyo-Cajamarca" - 2016						RQD (Deer - 1967) RMR (Bieniawski - 1989) SMR (Romana - 1997) SRC (Gonzales de V. - 2003) GSI (Hoek y Marinos-2007)	
RESPONSABLE:		UBIACIÓN:		HOJA:		DE:		RELLENO		ALTERAC. METEOR	
Elvis Rubén Alcántara Quispe		Elvis Rubén Alcántara Quispe						DUREZA		1=Inalt.	
1. DATA GPS		2. MACIZO ROCOSO		3 GSI (2)		6. PROPIEDADES DE LAS DISCONTINUIDADES					
SISTEMA:		2.1 UNIDAD		2.2 ROD		2.3 METEORIZACIÓN		VALOR:		ESTRUCTURA:	
ESTE:		Formación:		ND:		1: Fresco, 2: Lev Met, 3: Mod, 4: Alt Met, 5: Comp		Macizo		Homog.:	
NORTE:		Miembro:		L (m):		2.4 FRACTURACIÓN		Macizo		Tipo:	
COTA:		ERROR:		Litología (1):		λ (ND/L):		Heterog.:		5. AGUA SUBT.	
MARCA Y SERIE:		4. TALUD		Taud. Nat. (TN), Vol. o Cort. Perf (VCP), Precorte (P), Vol. Suave (VS), Vol. o Excav. Mec. (VES), Vol. Def. (VD):		Pie (m):		1. Seco, 2: Húmedo, 3: Mod. Alt., 4: Muy Alt., 5: Flujo:		5. AGUA SUBT.	
Altura (m):		Pie (a)		Talud (b)		Cabeza (c)					
Dirección		Azimut (Z):		Dip:							
Dip:											
<b>7. ESQUEMA</b> 											
Observaciones:											
*Dirección del MS: hacia abajo (1), hacia arriba (2), horizontal (3)= E:( ),D1:( ),D2:( ),D3:( )											



**LEYENDA**

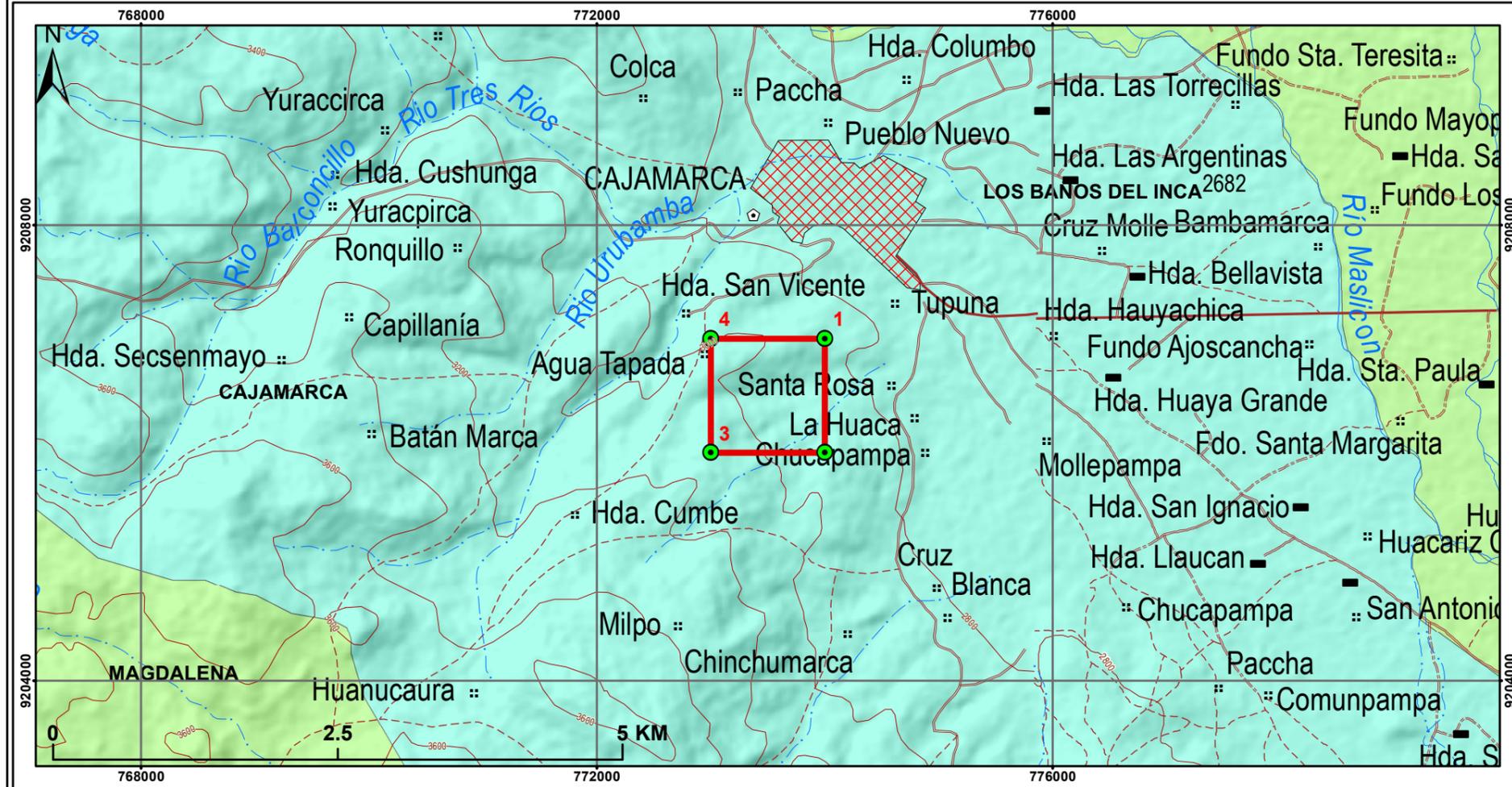
- Departamento de Cajamarca
- Provincia de Cajamarca
- Distrito de Cajamarca
- Ciudad de Cajamarca
- Zona de estudio

**SIMBOLOGÍA**

- Vértice de la zona de estudio
- Capital de Distrito
- Centro poblado
- Hacienda
- Aeropuerto
- Quebrada
- Río
- Curva de nivel a 200m
- Vía asfaltada
- Vía afirmada
- Trocha
- Camino

**VERTICES DE LA ZONA DE ESTUDIO UTM-WGS84**

VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	774000	9207000
2	774000	9206000
3	773000	9206000
4	773000	9207000



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

**TESIS PROFESIONAL:**  
APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

**PLANO:** UBICACIÓN

<b>TESISTA:</b>	Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe
<b>ASESOR:</b>	MCs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani
<b>SISTEMA:</b>	UTM-WGS84
<b>ESCALA:</b>	1/50.000
<b>FECHA:</b>	Enero 2017

P-01



### SIMBOLOGÍA

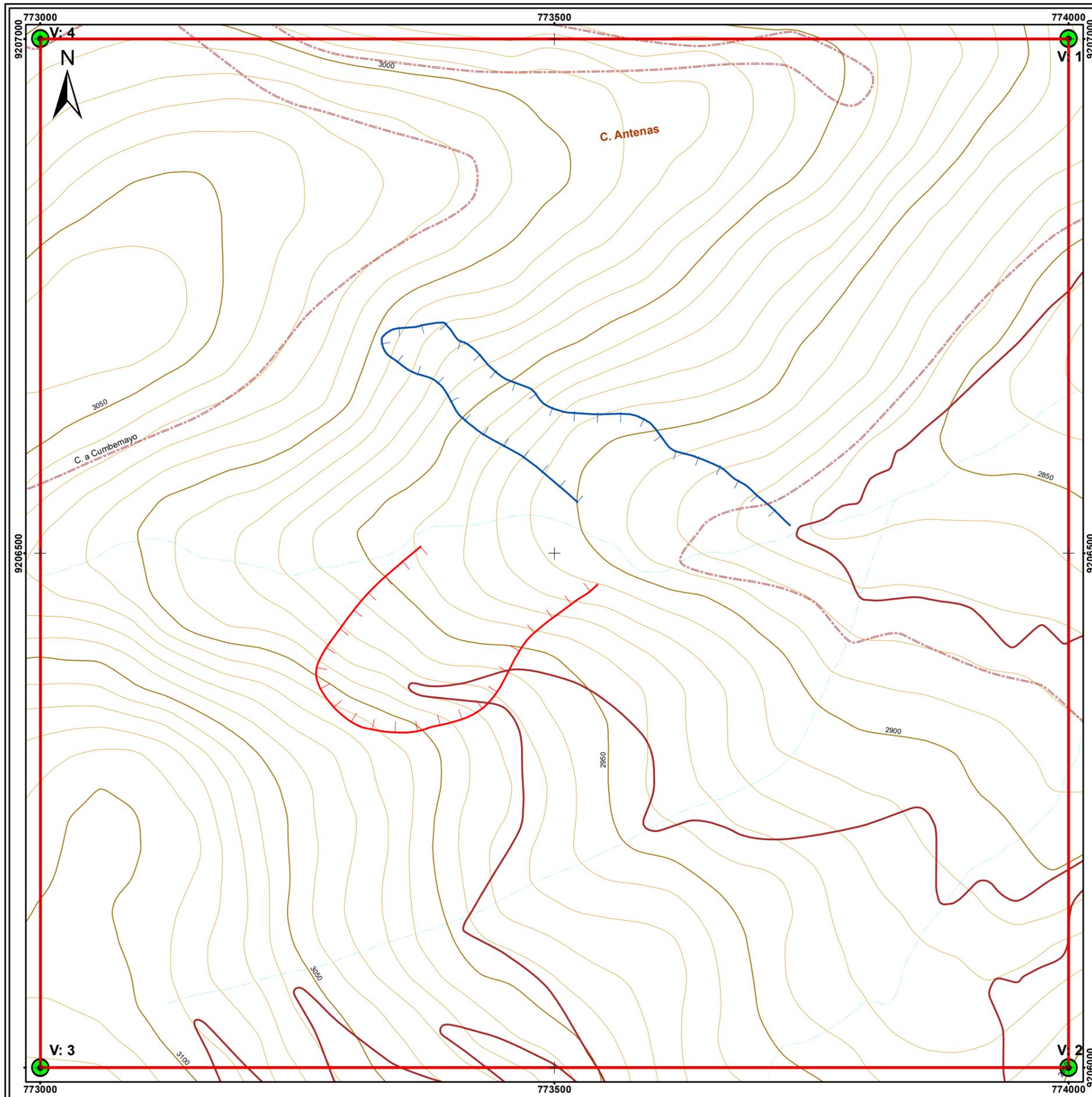
- ⦿ Centro Poblado
- Vértice de la zona de estudio
- ▭ Zona de estudio
- ~ Deslizamiento norte
- ~ Deslizamiento sur
- ~ Quebrada
- ~ Río

VERTICES DE LA ZONA DE ESTUDIO UTM-WGS84		
VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	774000	9207000
2	774000	9206000
3	773000	9206000
4	773000	9207000



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
	<b>TESIS PROFESIONAL:</b> APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA	
<b>PLANO:</b>	IMAGEN SATELITAL	
<b>TESISTA:</b>	Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe	
<b>ASESOR:</b>	MCs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani	
<b>SISTEMA:</b>	<b>ESCALA:</b>	<b>FECHA:</b>
UTM-WGS84	1/4 000	Enero 2017

**P-02**



**SIMBOLOGÍA**

- Vértice de la zona de estudio
- Zona de estudio
- Deslizamiento norte
- Deslizamiento sur
- Curva de nivel (50m)
- Curva de nivel (10m)
- Quebrada
- Vía asfaltada
- Vía afirmada
- Trocha carrozable

**VERTICES DE LA ZONA DE ESTUDIO UTM-WGS84**

VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	774000	9207000
2	774000	9206000
3	773000	9206000
4	773000	9207000



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

**TESIS PROFESIONAL:**  
 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

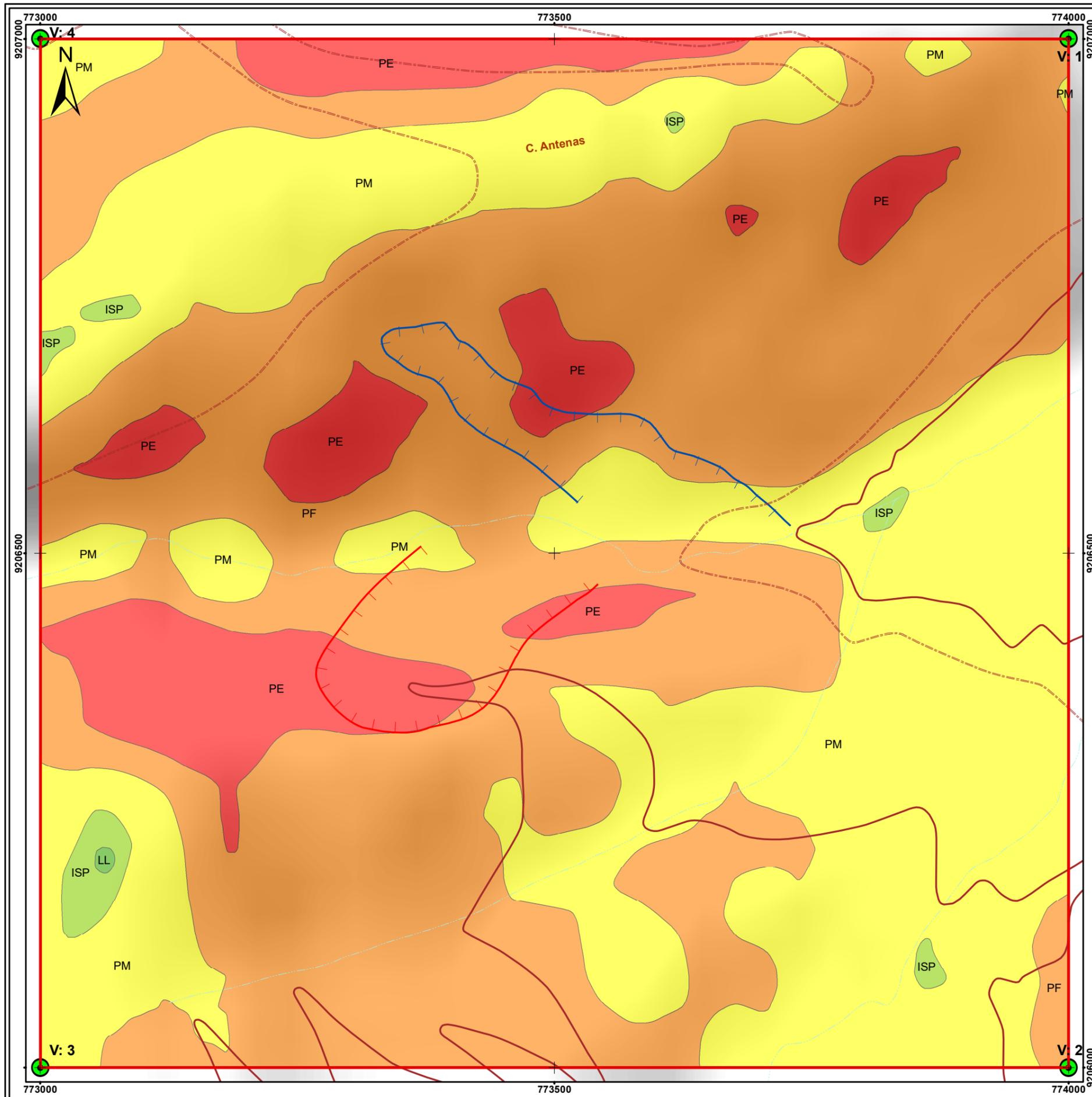
**PLANO:** TOPOGRÁFICO

**TESISTA:** Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe

**ASESOR:** MCs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani

**SISTEMA:** UTM-WGS84 | **ESCALA:** 1/4 000 | **FECHA:** Enero 2017

**P-03**



### SIMBOLOGÍA

- Vértice de la zona de estudio
- Zona de estudio
- Deslizamiento norte
- Deslizamiento sur
- Quebrada
- Vía asfaltada
- Vía afirmada
- Trocha carrozable

### TERRENOS

- LL: Llanos (<1°)
- ISP: Inclínados con suave pendiente (1°-5°)
- PM: Pendiente Moderada (5°-15°)
- PF: Pendiente Fuerte (15°-25°)
- PE: Pendiente Escarpada (25°-45°)

### VERTICES DE LA ZONA DE ESTUDIO UTM-WGS84

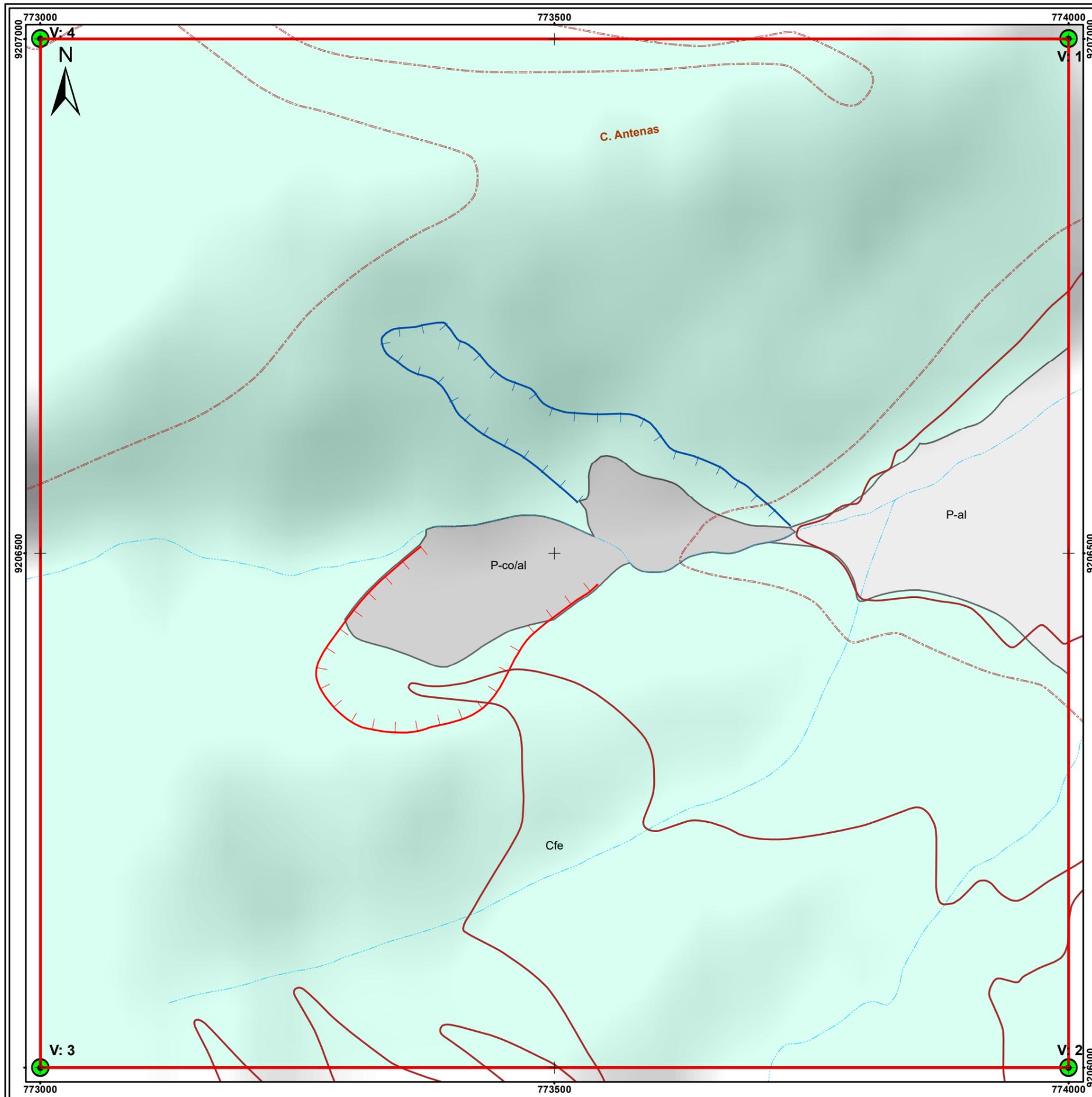
VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	774000	9207000
2	774000	9206000
3	773000	9206000
4	773000	9207000



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

**TESIS PROFESIONAL:**  
 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

<b>PLANO:</b> PENDIENTES	
<b>TESISTA:</b> Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe	P-04
<b>ASESOR:</b> M.Cs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani	
<b>SISTEMA:</b> UTM-WGS84	
<b>ESCALA:</b> 1/4 000	<b>FECHA:</b> Enero 2017



### SIMBOLOGÍA

- Vértice de la zona de estudio
- Zona de estudio
- Deslizamiento norte
- Deslizamiento sur
- Quebrada
- Vía asfaltada
- Vía afirmada
- Trocha carrozable

### UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

- Cfe: Colina fluvio-erosional
- Pie de monte aluvial
- Pie de monte coluvio-aluvial

#### VERTICES DE LA ZONA DE ESTUDIO UTM-WGS84

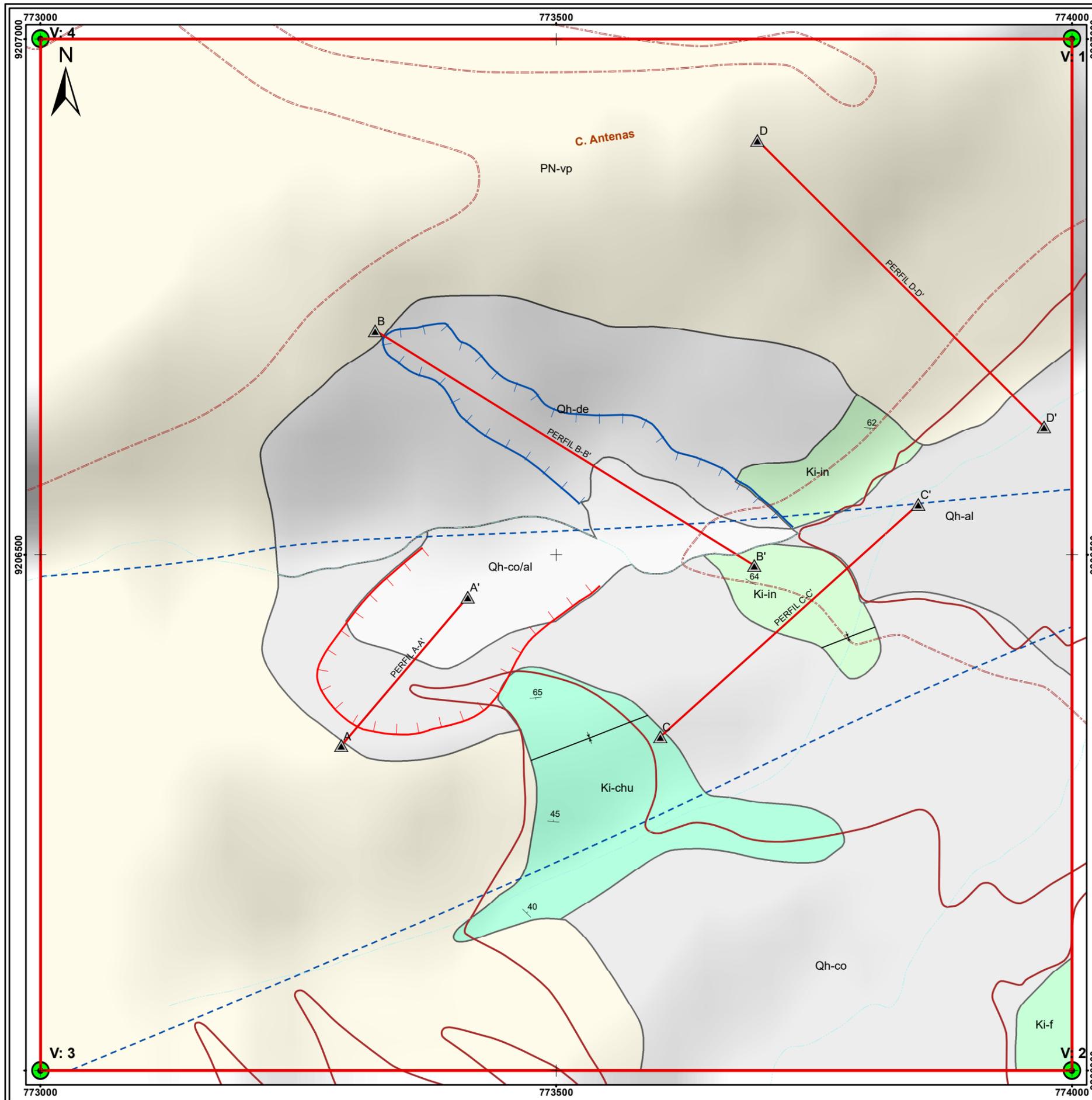
VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	774000	9207000
2	774000	9206000
3	773000	9206000
4	773000	9207000



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

**TESIS PROFESIONAL:**  
 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

<b>PLANO:</b> GEOMORFOLOGÍA	
<b>TESISTA:</b> Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe	P-05
<b>ASESOR:</b> MCs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani	
<b>SISTEMA:</b> UTM-WGS84 <b>ESCALA:</b> 1/4 000 <b>FECHA:</b> Enero 2017	



### SIMBOLOGÍA

- Vértice de la zona de estudio
- Zona de estudio
- Punto de perfil
- Línea de perfil
- Deslizamiento norte
- Deslizamiento sur
- Quebrada
- Vía asfaltada
- Vía afirmada
- Trocha carrozable
- Rumbo y buzamiento
- Sinclinal
- Alineamiento

### UNIDADES LITO-ESTRATIGRÁFICAS

- Qh-co/al: Depósito coluvio-aluvial
- Qh-de: Depósito deluvial
- Qh-co: Depósito coluvial
- Qh-al: Cuaternario aluvial
- PN-vp: Formación Porculla
- Ki-chu: Formación Chúlec
- Ki-in: Formación Inca
- Ki-f: Formación Farrat

#### VERTICES DE LA ZONA DE ESTUDIO UTM-WGS84

VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	774000	9207000
2	774000	9206000
3	773000	9206000
4	773000	9207000



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

**TESIS PROFESIONAL:**  
 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

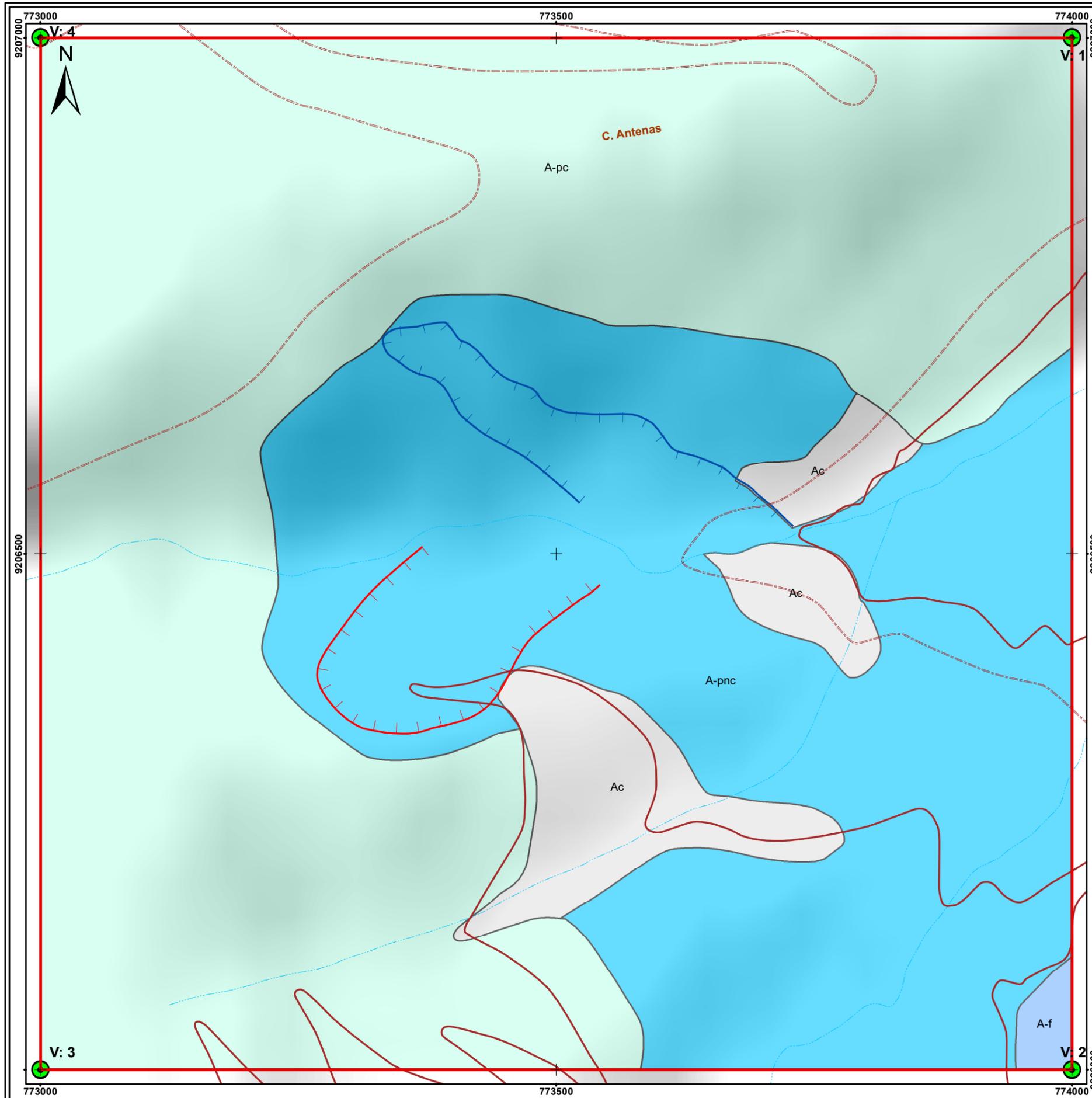
**PLANO:** GEOLOGÍA

**TESISTA:** Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe

**ASESOR:** M.Cs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani

**SISTEMA:** UTM-WGS84    **ESCALA:** 1/4 000    **FECHA:** Enero 2017

P-06



### SIMBOLOGÍA

- Vértice de la zona de estudio
- Zona de estudio
- Deslizamiento norte
- Deslizamiento sur
- Quebrada
- Vía asfaltada
- Vía afirmada
- Trocha carrozable

### UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

- A-f: Acuífero fisurado
- A-pc: Acuífero poroso consolidado
- A-pnc: Acuífero poroso no consolidado
- Ac: Acuitardo

#### VERTICES DE LA ZONA DE ESTUDIO UTM-WGS84

VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	774000	9207000
2	774000	9206000
3	773000	9206000
4	773000	9207000

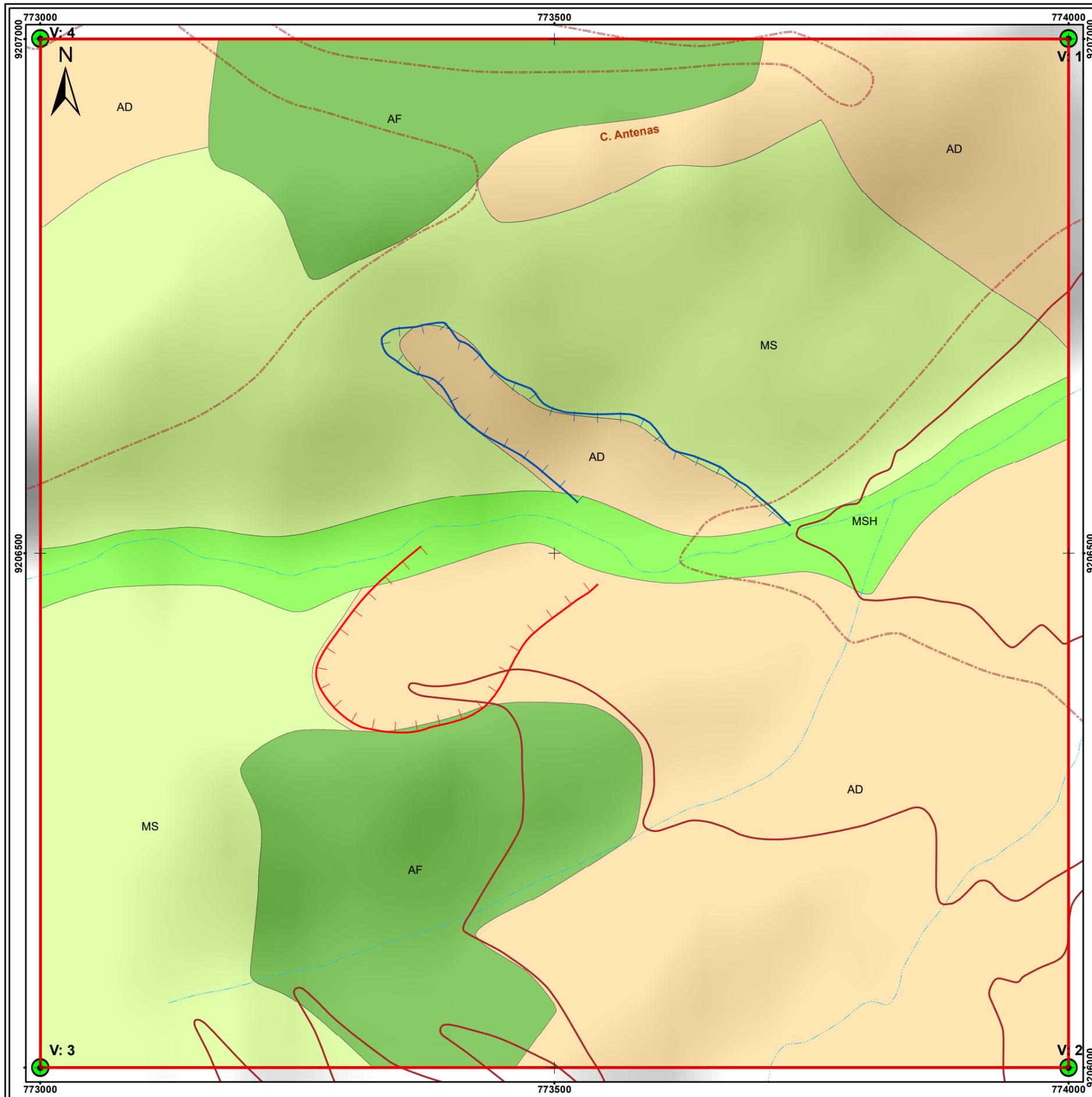


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

**TESIS PROFESIONAL:**  
 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

<b>PLANO:</b> HIDROGEOLOGÍA	
<b>TESISTA:</b>	Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe
<b>ASESOR:</b>	MCs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani
<b>SISTEMA:</b> UTM-WGS84	<b>ESCALA:</b> 1/4 000
<b>FECHA:</b> Enero 2017	

P-07



### SIMBOLOGÍA

- Vértice de la zona de estudio
- Zona de estudio
- Deslizamiento norte
- Deslizamiento sur
- Quebrada
- Vía asfaltada
- Vía afirmada
- Trocha carrozable

### COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELOS

- AD: Área Deforestada
- AF: Área Forestada
- MS: Matorral Seco
- MSH: Matorral Semi-Seco

### VERTICES DE LA ZONA DE ESTUDIO UTM-WGS84

VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	774000	9207000
2	774000	9206000
3	773000	9206000
4	773000	9207000



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

**TESIS PROFESIONAL:**  
 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES  
 SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

**PLANO:** COBERTURA VEGETAL

<b>TESISTA:</b> Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe	<b>P-08</b>
<b>ASESOR:</b> MCs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani	
<b>SISTEMA:</b> UTM-WGS84 <b>ESCALA:</b> 1/4 000 <b>FECHA:</b> Enero 2017	

EON	ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITO-ESTRATIGRÁFICAS	ABR.	ESP. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN			
FANEROZOICO	CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Dep. Coluvio-Aluviales	Qh-co/al	30		Depósitos coluvio-aluviales con suelos CL>GC			
				Dep. Deluviales	Qh-de	20		Depósitos deluviales con suelos MH>CL			
				Dep. Coluviales	Qh-co	30		Depósitos coluviales con suelos GC>CH			
				Dep. Aluviales	Qh-al	50		Depósitos aluviales con suelos GC>GM			
	CENOZOICO	PALEÓGENO / NEÓGENO	OLIGOCENO / MIOCENO	Fm. Porculla	PN-vp	300	Discontinuidad angular	Tobas traquíticas de color blanquesino ricas en cristales			
				Fm. Chulec	Ki-chu	250	Discontinuidad angular	Lutitas calcareas intercaladas con calizas wackestone			
				Fm. Inca	Ki-in	150	Areniscas ferruginosas intercaladas con lutitas cuarzosas				
				Fm. Farrat	Ki-f	250	Areniscas cuarzosas intercaladas con limolitas cuarzosas				
				MESOZOICO	CRETÁCEO	INFERIOR					



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

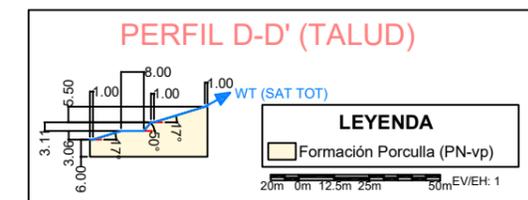
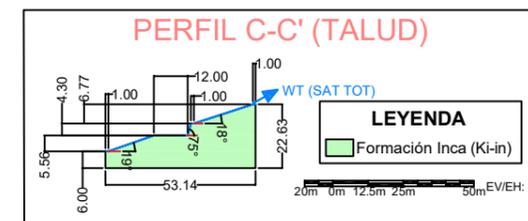
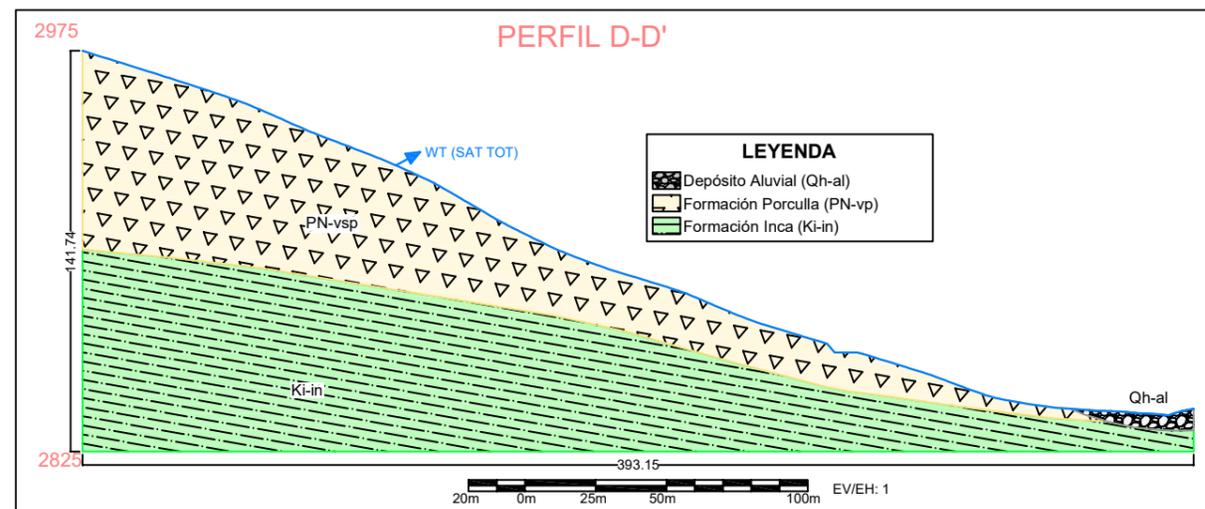
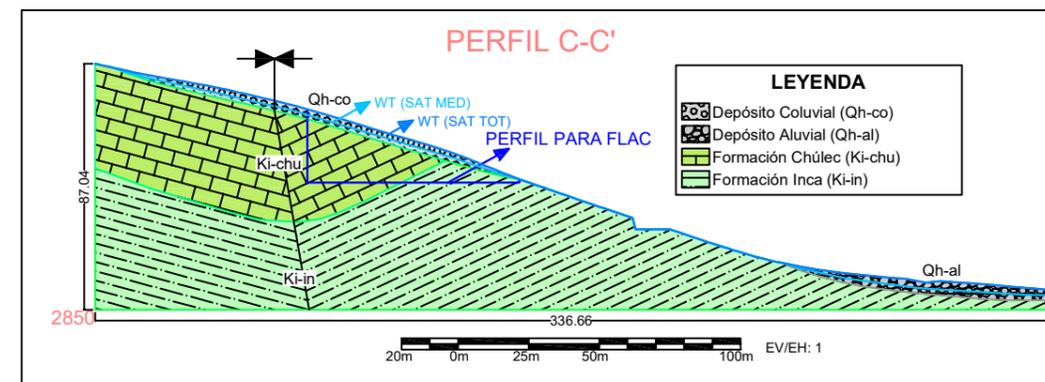
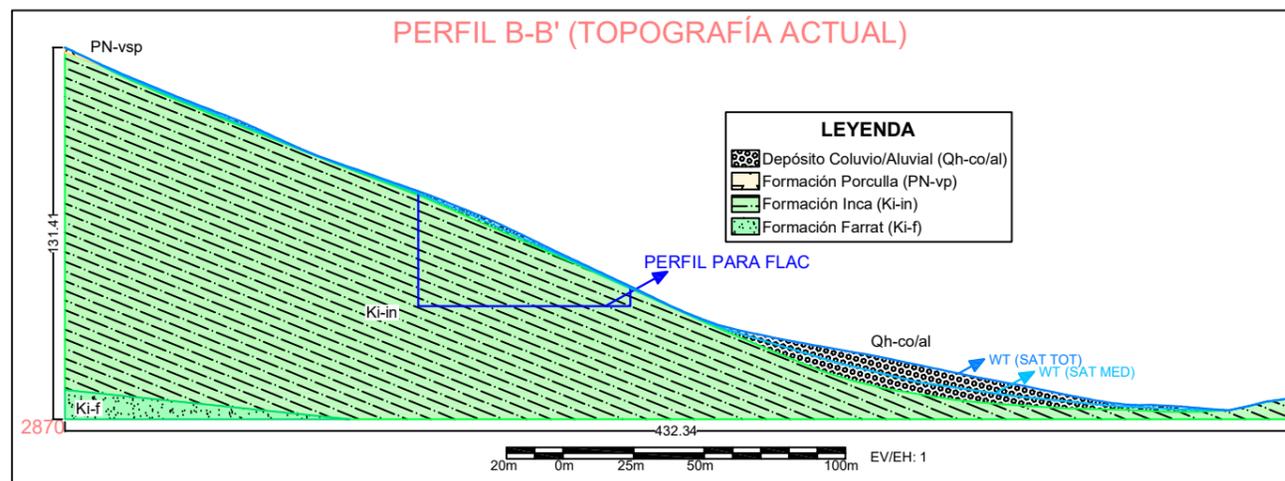
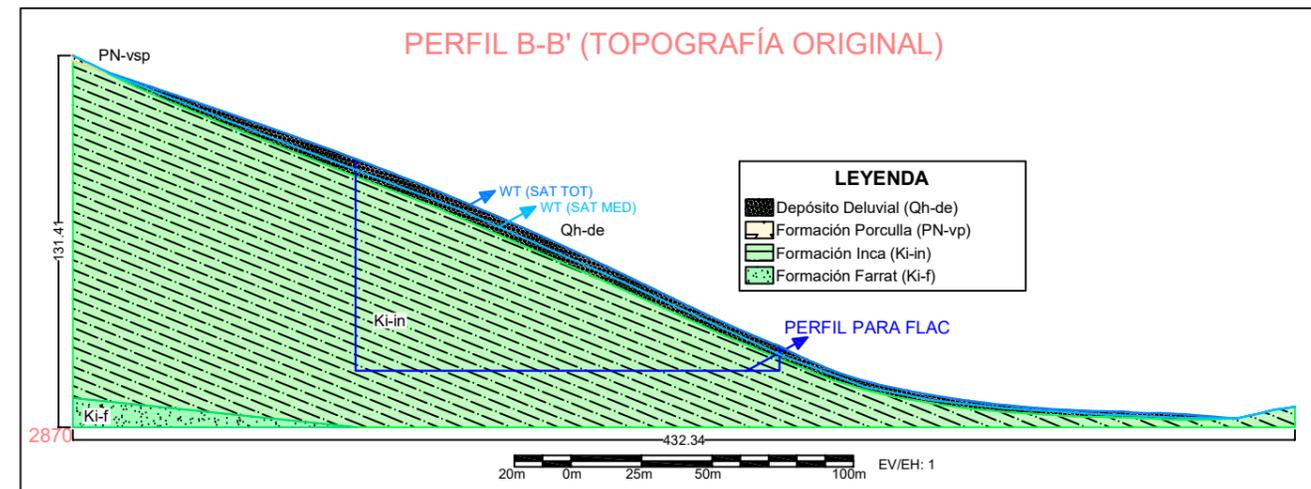
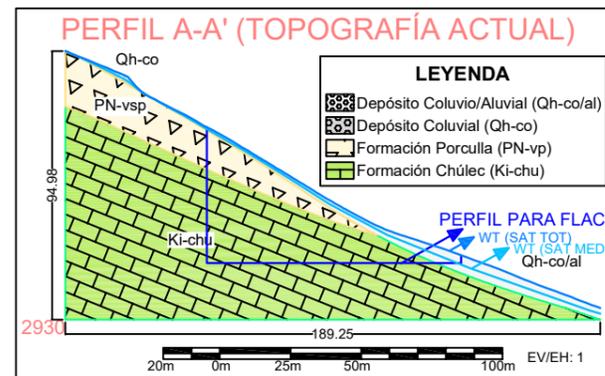
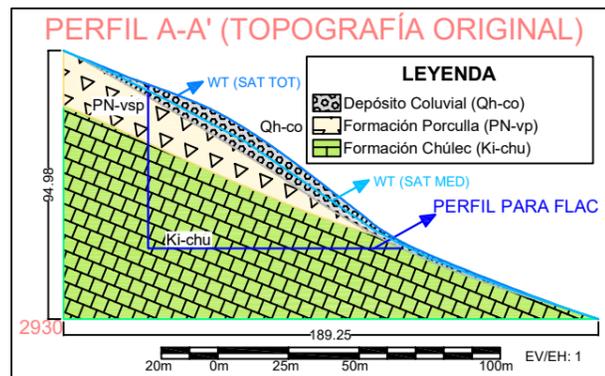
**TESIS PROFESIONAL:**  
APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

OCTUBRE DEL 2016

**TESISTA:** Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe

**ASESOR:** MCs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani



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

**TESIS PROFESIONAL:**  
APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES SECTOR CALSPUQUIO-CAJAMARCA

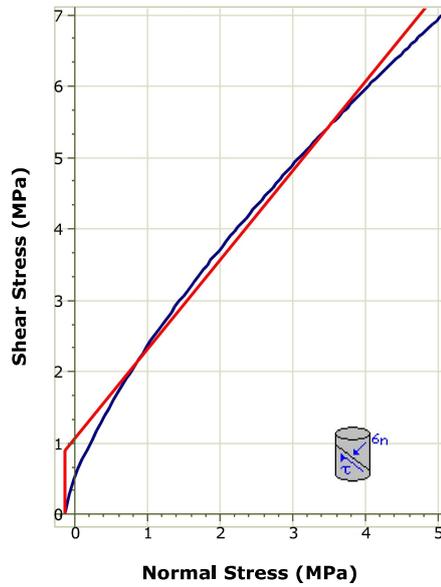
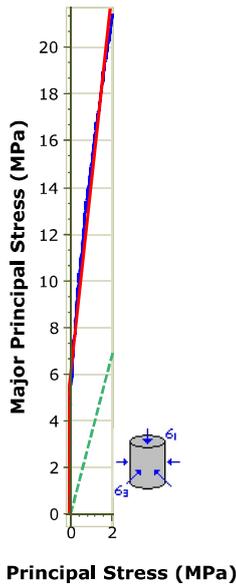
PERFILES: A-A' (T ORIG Y ACT), B-B' (T ORIG Y ACT), C-C' (Y TALUD), D-D' (Y TALUD)

**TESISTA:** Bach. Elvis Rubén Alcántara Quispe

**ASESOR:** M.Cs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani

**SISTEMA:** UTM-WGS84 | **ESCALA:** 1/2 500 | **FECHA:** Octubre 2016

**PR-U**

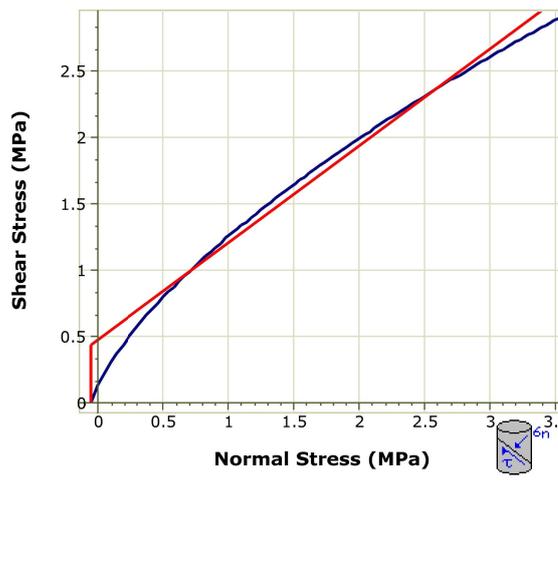
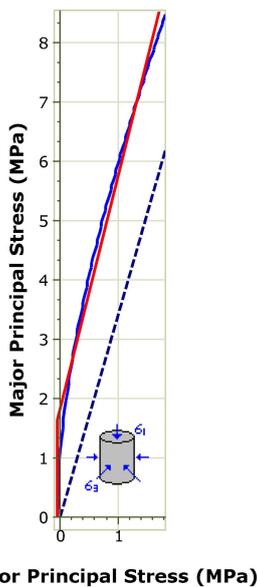


- Ki-f - Principal Stress Envelope
- Mogi
- Ki-f - Mohr-Coulomb Envelope
- Ki-f - Shear vs. Normal Stress Envelope
- Ki-f - Mohr-Coulomb Envelope

Ki-f	
<b>Hoek Brown Classification</b>	
intact uniaxial compressive strength	35 MPa
GSI	65
mi	17
disturbance factor	0
intact modulus	9625 MPa
modulus ratio	275
<b>Hoek Brown Criterion</b>	
mb	4.871
s	0.02
a	0.502
<b>Failure Envelope Range</b>	
application	slopes
sig3max	2.017 MPa
unit weight	0.025 MN/m3
slope height	100 m
<b>Mohr Coulomb Fit</b>	
cohesion	1.076 MPa
friction angle	51.274 deg
<b>Rock Mass Parameters</b>	
tensile strength	-0.147 MPa
uniaxial compressive strength	4.969 MPa
global strength	10.843 MPa
modulus of deformation	6080.299 MPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA			
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISTAS	ROCDATA N°: 1	PROPIEDADES GEOMECANICAS Ki-f	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

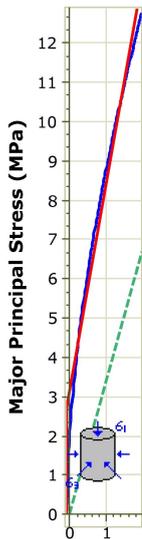


- Ki-in - Principal Stress Envelope
- Mogi
- Ki-in - Mohr-Coulomb Envelope
- Ki-in - Shear vs. Normal Stress Envelope
- Ki-in - Mohr-Coulomb Envelope

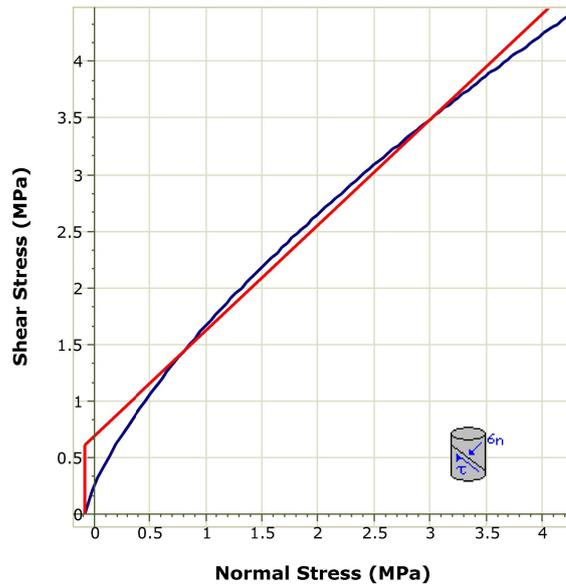
Ki-in	
<b>Hoek Brown Classification</b>	
intact uniaxial compressive strength	25 MPa
GSI	45
mi	7
disturbance factor	0
intact modulus	9375 MPa
modulus ratio	375
<b>Hoek Brown Criterion</b>	
mb	0.982
s	0.002
a	0.508
<b>Failure Envelope Range</b>	
application	slopes
sig3max	1.778 MPa
unit weight	0.024 MN/m3
slope height	100 m
<b>Mohr Coulomb Fit</b>	
cohesion	0.475 MPa
friction angle	36.206 deg
<b>Rock Mass Parameters</b>	
tensile strength	-0.056 MPa
uniaxial compressive strength	1.121 MPa
global strength	3.289 MPa
modulus of deformation	2096.718 MPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA			
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISTAS	ROCDATA N°: 2	PROPIEDADES GEOMECANICAS Ki-in	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



Minor Principal Stress (MPa)



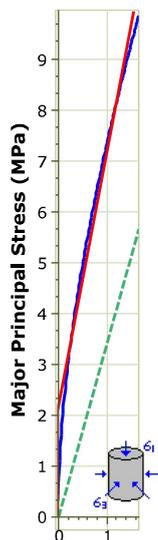
Normal Stress (MPa)

- Ki-chu - Principal Stress Envelope
- Mogi
- Ki-chu - Mohr-Coulomb Envelope
- Ki-chu - Shear vs. Normal Stress Envelope
- Ki-chu - Mohr-Coulomb Envelope

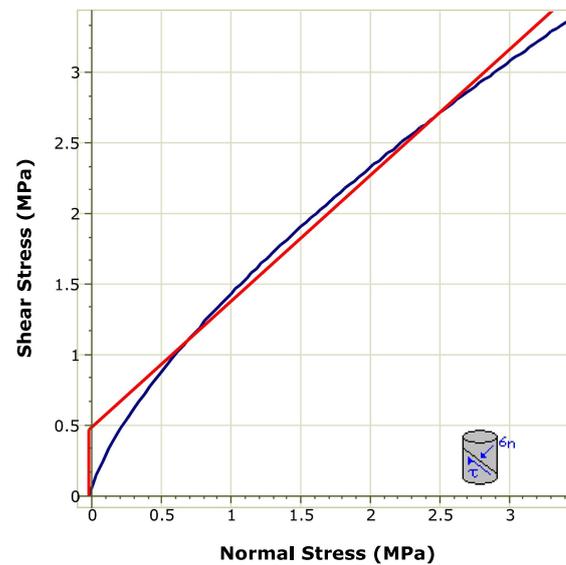
Ki-chu	
<b>Hoek Brown Classification</b>	
intact uniaxial compressive strength	35 MPa
GSI	50
mi	10
disturbance factor	0
intact modulus	24500 MPa
modulus ratio	700
<b>Hoek Brown Criterion</b>	
mb	1.677
s	0.004
a	0.506
<b>Failure Envelope Range</b>	
application	slopes
sig3max	1.915 MPa
unit weight	0.025 MN/m3
slope height	100 m
<b>Mohr Coulomb Fit</b>	
cohesion	0.683 MPa
friction angle	43.054 deg
<b>Rock Mass Parameters</b>	
tensile strength	-0.081 MPa
uniaxial compressive strength	2.108 MPa
global strength	6.102 MPa
modulus of deformation	7526.055 MPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA			
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	ROCDATA N°: 3	PROPIEDADES GEOMECANICAS Ki-chu	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



Minor Principal Stress (MPa)



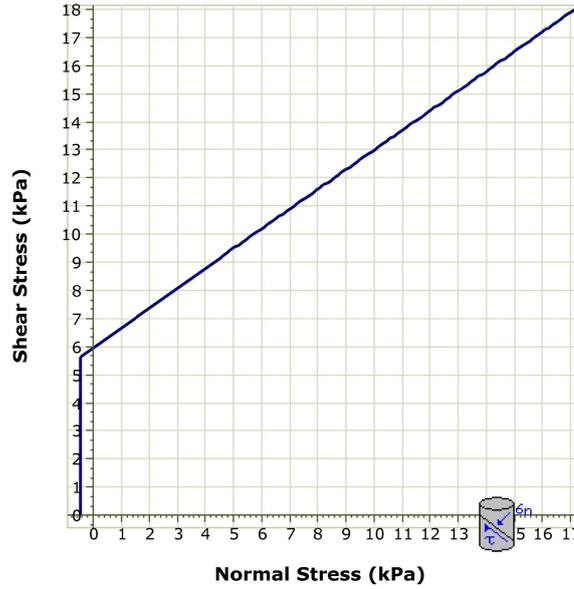
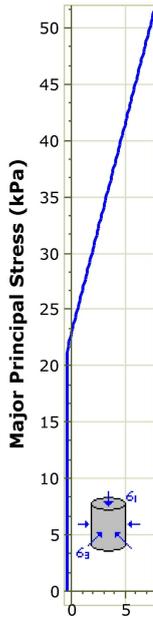
Normal Stress (MPa)

- PN-vsp - Principal Stress Envelope
- Mogi
- PN-vsp - Mohr-Coulomb Envelope
- PN-vsp - Shear vs. Normal Stress Envelope
- PN-vsp - Mohr-Coulomb Envelope

PN-vsp	
<b>Hoek Brown Classification</b>	
intact uniaxial compressive strength	30 MPa
GSI	38
mi	13
disturbance factor	0
intact modulus	9000 MPa
modulus ratio	300
<b>Hoek Brown Criterion</b>	
mb	1.42
s	0.001
a	0.513
<b>Failure Envelope Range</b>	
application	slopes
sig3max	1.621 MPa
unit weight	0.021 MN/m3
slope height	100 m
<b>Mohr Coulomb Fit</b>	
cohesion	0.483 MPa
friction angle	41.757 deg
<b>Rock Mass Parameters</b>	
tensile strength	-0.022 MPa
uniaxial compressive strength	0.876 MPa
global strength	4.565 MPa
modulus of deformation	1252.826 MPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA			
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	ROCDATA N°: 4	PROPIEDADES GEOMECANICAS PN-vsp	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

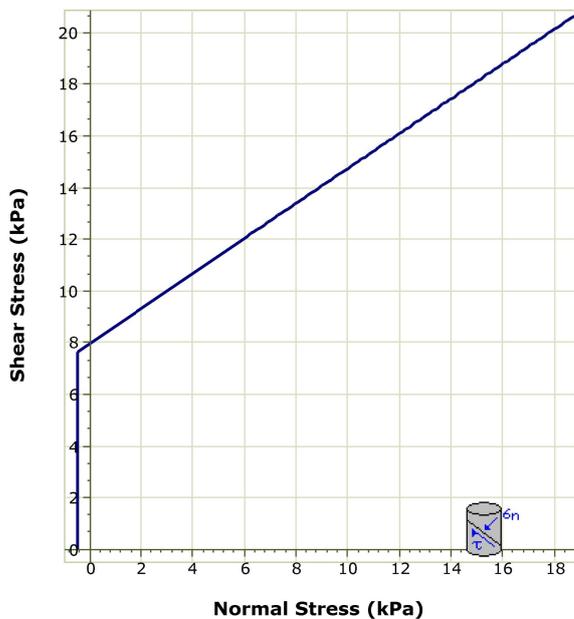
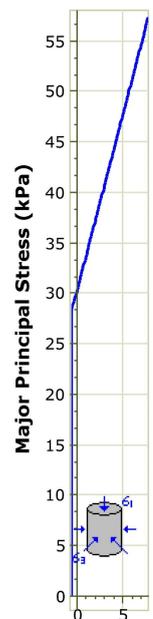


<b>Qh-al</b>	
<b>Mohr Coulomb Criterion</b>	
cohesion	6 kPa
friction angle	35 deg
tensile strength	-0.5 kPa
uniaxial compressive strength	23.052 kPa
alpha	74.838 deg

— Qh-al - Principal Stress Envelope  
 — Qh-al - Shear vs. Normal Stress Envelope



<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> FACULTAD DE INGENIERIA			
<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	ROCDATA N°: 5	PROPIEDADES GEOMECANICAS Qh-al	FECHA
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

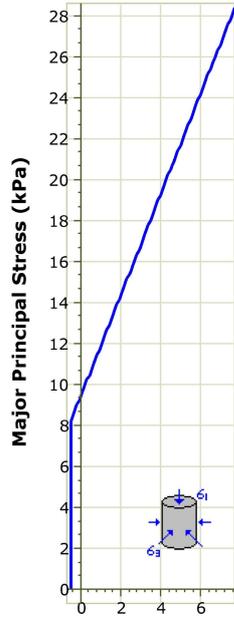


<b>Qh-co</b>	
<b>Mohr Coulomb Criterion</b>	
cohesion	8 kPa
friction angle	34 deg
tensile strength	-0.5 kPa
uniaxial compressive strength	30.092 kPa
alpha	74.214 deg

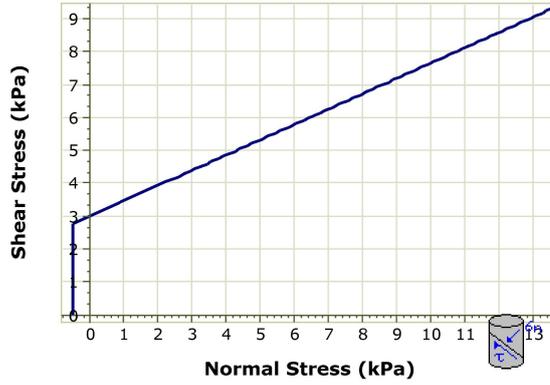
— Qh-co - Principal Stress Envelope  
 — Qh-co - Shear vs. Normal Stress Envelope



<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> FACULTAD DE INGENIERIA			
<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	ROCDATA N°: 6	PROPIEDADES GEOMECANICAS Qh-co	FECHA
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



Minor Principal Stress (kPa)



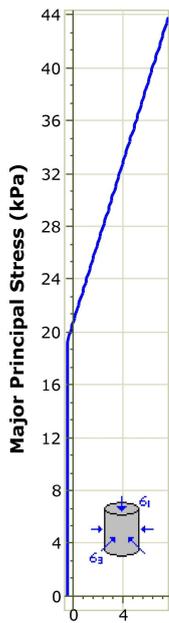
Normal Stress (kPa)

Qh-de	
<b>Mohr Coulomb Criterion</b>	
cohesion	3 kPa
friction angle	25 deg
tensile strength	-0.5 kPa
uniaxial compressive strength	9.418 kPa
alpha	67.91 deg

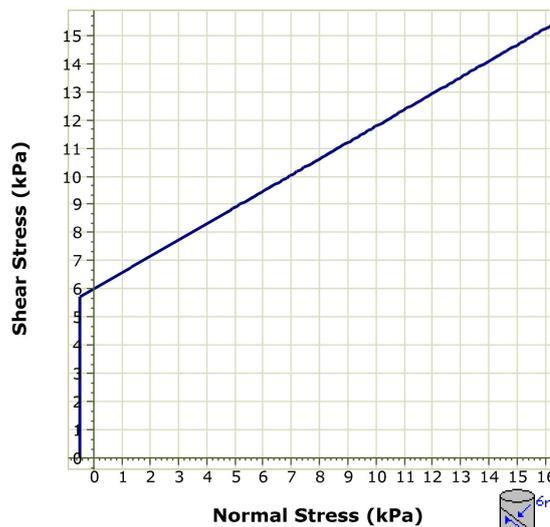
- Qh-de - Principal Stress Envelope
- Qh-de - Shear vs. Normal Stress Envelope



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA			
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	ROCDATA N°: 7	PROPIEDADES GEOMECANICAS Qh-de	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



Minor Principal Stress (kPa)



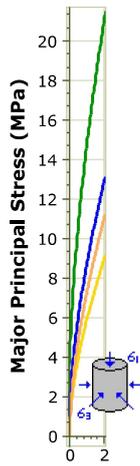
Normal Stress (kPa)

Qh-co/al	
<b>Mohr Coulomb Criterion</b>	
cohesion	6 kPa
friction angle	30 deg
tensile strength	-0.5 kPa
uniaxial compressive strength	20.785 kPa
alpha	71.565 deg

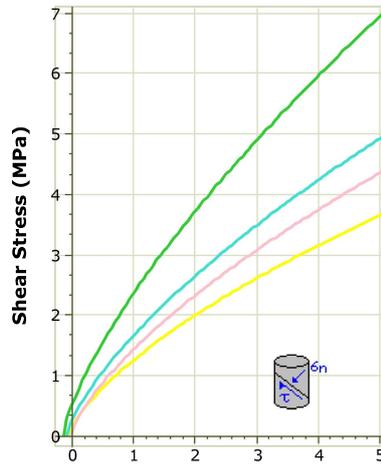
- Qh-co/al - Principal Stress Envelope
- Qh-co/al - Shear vs. Normal Stress Envelope



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA			
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	ROCDATA N°: 8	PROPIEDADES GEOMECANICAS Qh-co/al	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



Minor Principal Stress (MPa)



Normal Stress (MPa)

- Ki-f - Principal Stress Envelope
- Ki-in - Principal Stress Envelope
- Ki-chu - Principal Stress Envelope
- PN-vsp - Principal Stress Envelope
- Ki-f - Shear vs. Normal Stress Envelope
- Ki-in - Shear vs. Normal Stress Envelope
- Ki-chu - Shear vs. Normal Stress Envelope
- PN-vsp - Shear vs. Normal Stress Envelope



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA  
FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS

ROCDATA N°: 9

COMPARACION DE RESISTENCIAS DE LOS MACIZOS ROCOSOS

FECHA

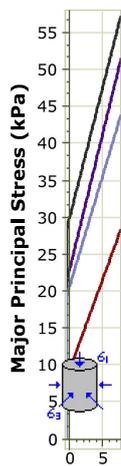
SEPTIEMBRE DEL 2016

TESISTA

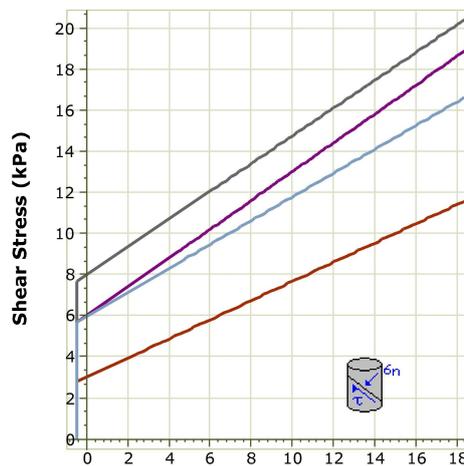
BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE

ASESOR

MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



Minor Principal Stress (kPa)



Normal Stress (kPa)

- Qh-al - Principal Stress Envelope
- Qh-co - Principal Stress Envelope
- Qh-de - Principal Stress Envelope
- Qh-co/al - Principal Stress Envelope
- Qh-al - Shear vs. Normal Stress Envelope
- Qh-co - Shear vs. Normal Stress Envelope
- Qh-de - Shear vs. Normal Stress Envelope
- Qh-co/al - Shear vs. Normal Stress Envelope



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA  
FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS

ROCDATA N°: 10

COMPARACION DE RESISTENCIAS DE LOS SUELOS

FECHA

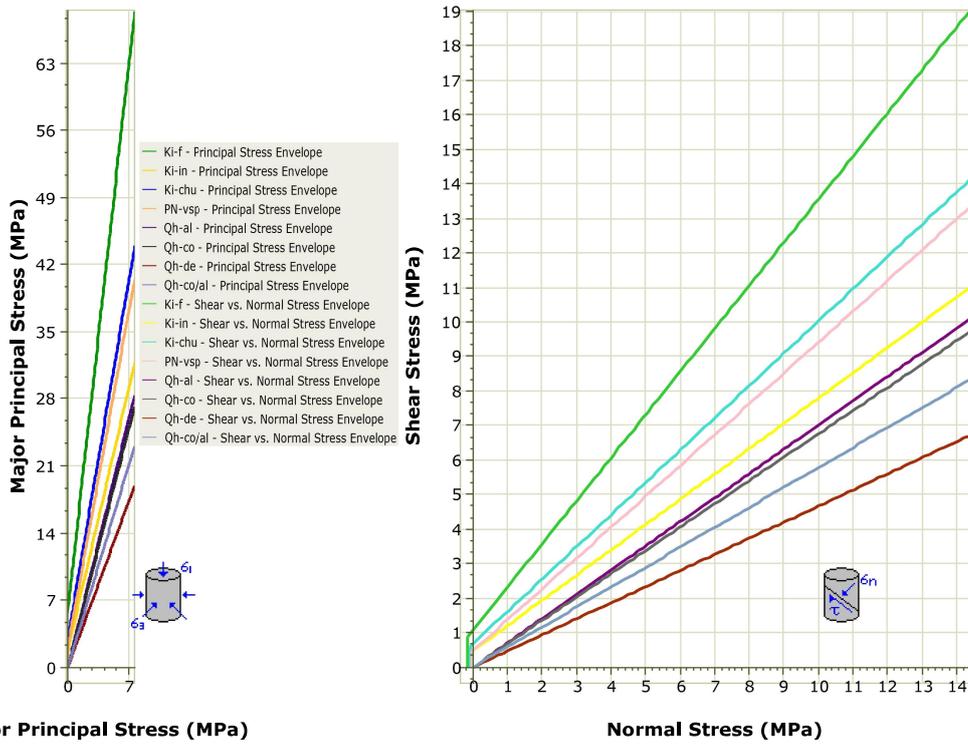
SEPTIEMBRE DEL 2016

TESISTA

BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE

ASESOR

MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS

ROCDATA N°: 11

COMPARACION DE RESISTENCIAS DE LOS MATERIALES

FECHA

SEPTIEMBRE DEL 2016

TESISTA

BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE

ASESOR

MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

**PROPIEDADES GEOMECÁNICAS - N°1: FORMACIÓN FARRAT (Ki-f)**

TIPO DE MACIZO								
Homogéneo								
ROCA PREDOMINANTE:								
Arenisca								
DENSIDAD SECA								
2450 Kg/m3								
POROSIDAD								
0.16								
DENSIDAD SATURADA								
2610 Kg/m3								
ALTURA PROMEDIO TALUDES								
100 m								
PARÁMETRO ENTRADA		VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO SALIDA	VALOR	UNIDAD		
$\sigma_{(ci)}$	Clase	3	R	Criterio Hoek-Brown	mb	4.87058	-	
	Valor	35	MPa		s	0.0204681	-	
GSI	Directo	Valor	65		-	a	0.501975	-
	Cuantificado	RQD	60	-	Mohr-Coulomb Fit	c	1.07578	MPa
		JCond89	25	-		$\phi$	51.2742	grados
		Valor	67	-		$\sigma_t$	-0.147084	MPa
mi		17	-	Parametros del macizo rocoso	$\sigma_c$	4.96902	MPa	
Factor de disturbación		0	-		$\sigma_{cm}$	10.843	MPa	
Relación de Módulo		275	-		Erm	6080.3	MPa	
Ei		9625	MPa	Tipo de rotura (Mogi)	Frágil	-		

**PROPIEDADES GEOMECÁNICAS - N°2: FORMACIÓN INCA (Ki-in)**

TIPO DE MACIZO:							
Heterogéneo							
ROCA PREDOMINANTE:							
Limolita							
DENSIDAD SECA:							
2400 Kg/m3							
POROSIDAD:							
0.085							
DENSIDAD SATURADA:							
2485 Kg/m3							
ALTURA PROMEDIO TALUDES:							
100 m							
PARÁMETRO ENTRADA		VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO SALIDA	VALOR	UNIDAD	
$\sigma_{(ci)}$	Clase	2	R	Criterio Hoek-Brown	mb	0.981792	-
	Valor	25	MPa		s	0.0022181	-
GSI	Heterog.	Heterog.	-		a	0.508086	-
	Roca no resistente	Lutita	-	Mohr-Coulomb Fit	c	0.474672	MPa
	Tipo de macizo	V	-		$\phi$	36.2062	grados
	Valor	45	-		$\sigma_t$	-0.0564805	MPa
mi		7	-	Parametros del macizo rocoso	$\sigma_c$	1.12065	MPa
Factor de disturbación		0	-		$\sigma_{cm}$	3.2886	MPa
Relación de Módulo		375	-		Erm	2096.72	MPa
Ei		9375	MPa	Tipo de rotura (Mogi)	Frágil	-	

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS - N°3: FORMACIÓN CHÚLEC (Ki-chu)							
TIPO DE MACIZO							
Heterogéneo							
ROCA PREDOMINANTE:							
Caliza esparítica							
DENSIDAD SECA							
2450 Kg/m3							
POROSIDAD							
0.11							
DENSIDAD SATURADA							
2560 Kg/m3							
ALTURA PROMEDIO TALUDES		E: 773639, N: 9206214, Z: 2940					
100 m							
PARÁMETRO ENTRADA	VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO SALIDA	VALOR	UNIDAD		
$\sigma_{(ci)}$	Clase	3	R	Criterio Hoek-Brown	mb	1.67677	-
	Valor	35	MPa		s	0.0038659	-
GSI	Heterog.	Heterog.	-		a	0.505734	-
	Roca no resistente	Lutita	-	Mohr-Coulomb Fit	c	0.682811	MPa
	Tipo de macizo	IV	-		$\phi$	43.0543	grados
	Valor	50	-	Parametros del macizo rocoso	$\sigma_t$	-0.080695	MPa
mi	10	-	$\sigma_c$		2.10795	MPa	
Factor de disturbación	0	-	$\sigma_{cm}$		6.10167	MPa	
Relación de Módulo	700	-	Erm		7526.05	MPa	
Ei	24500	MPa	Tipo de rotura (Mogi)	Frágil	-	-	

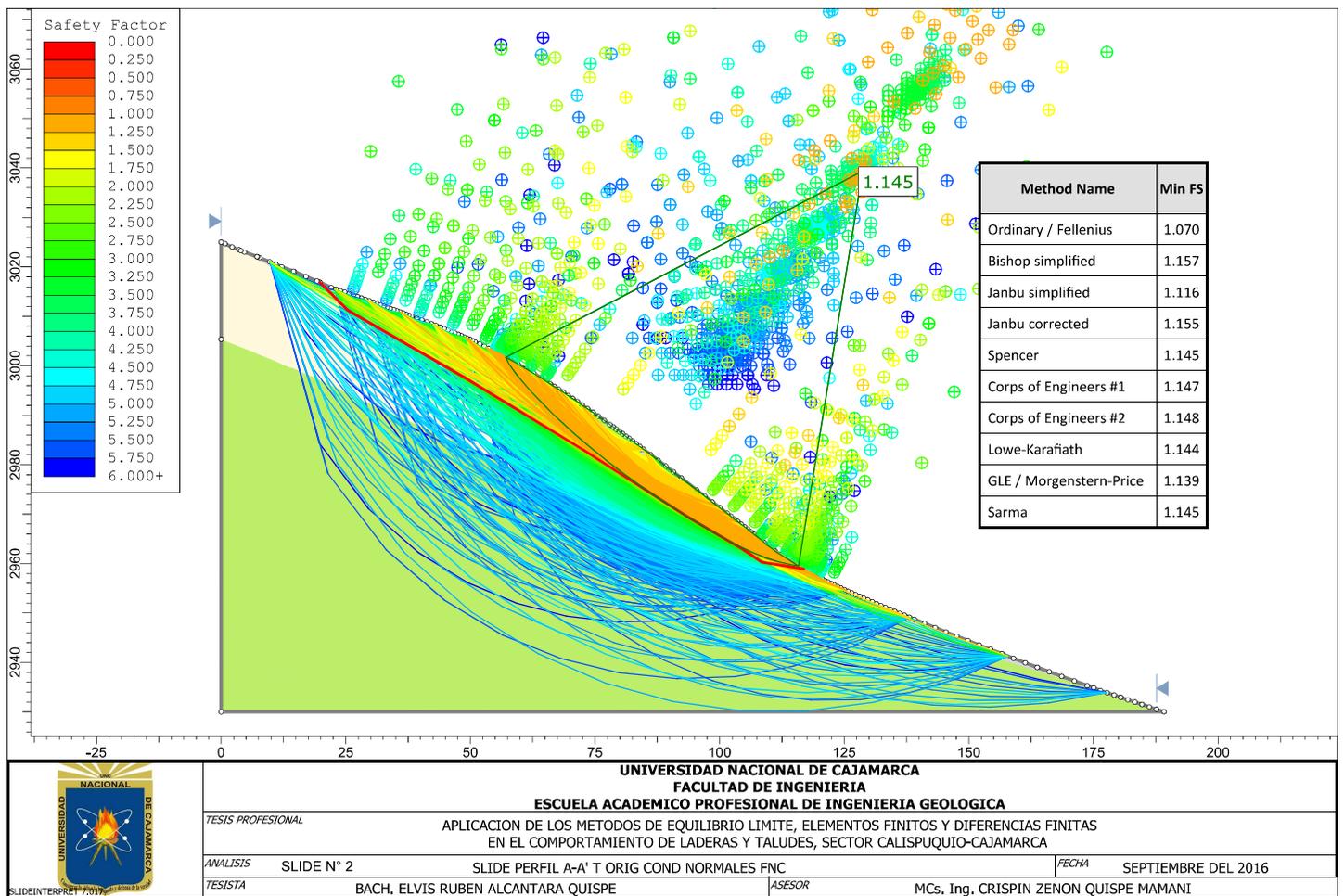
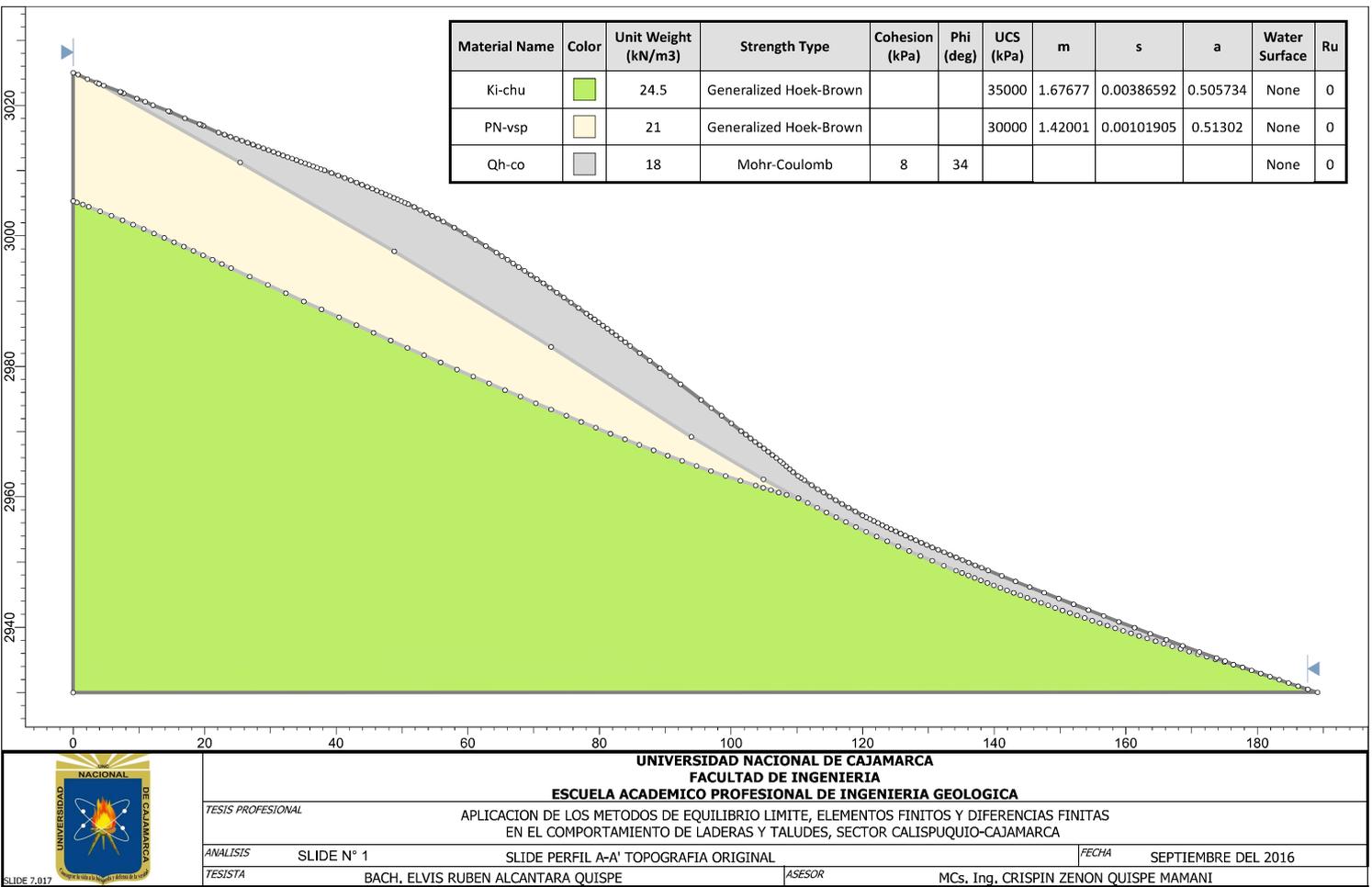
PROPIEDADES GEOMECÁNICAS - N°4: FORMACIÓN PORCULLA (PN-vp)								
TIPO DE MACIZO:								
Homogéneo								
ROCA PREDOMINANTE:								
Toba								
DENSIDAD SECA:								
2100 Kg/m3								
POROSIDAD:								
0.27								
DENSIDAD SATURADA:								
2370 Kg/m3								
ALTURA PROMEDIO TALUDES:		E: 773442, N: 9206196, Z: 2989						
100 m								
PARÁMETRO ENTRADA	VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO SALIDA	VALOR	UNIDAD			
$\sigma_{(ci)}$	Clase	3	R	Criterio Hoek-Brown	mb	1.42001	-	
	Valor	30	MPa		s	0.0010191	-	
GSI	Directo	Valor	38		-	a	0.51302	-
	Cuantificado	RQD	25	-	Mohr-Coulomb Fit	c	0.483318	MPa
		JCond89	15	-		$\phi$	41.7566	grados
		Valor	35	-	Parametros del macizo rocoso	$\sigma_t$	-0.021529	MPa
mi	13	-	$\sigma_c$	0.875516		MPa		
Factor de disturbación	0	-	$\sigma_{cm}$	4.56489		MPa		
Relación de Módulo	300	-	Erm	1252.83		MPa		
Ei	9000	MPa	Tipo de rotura (Mogi)	Frágil	-	-		

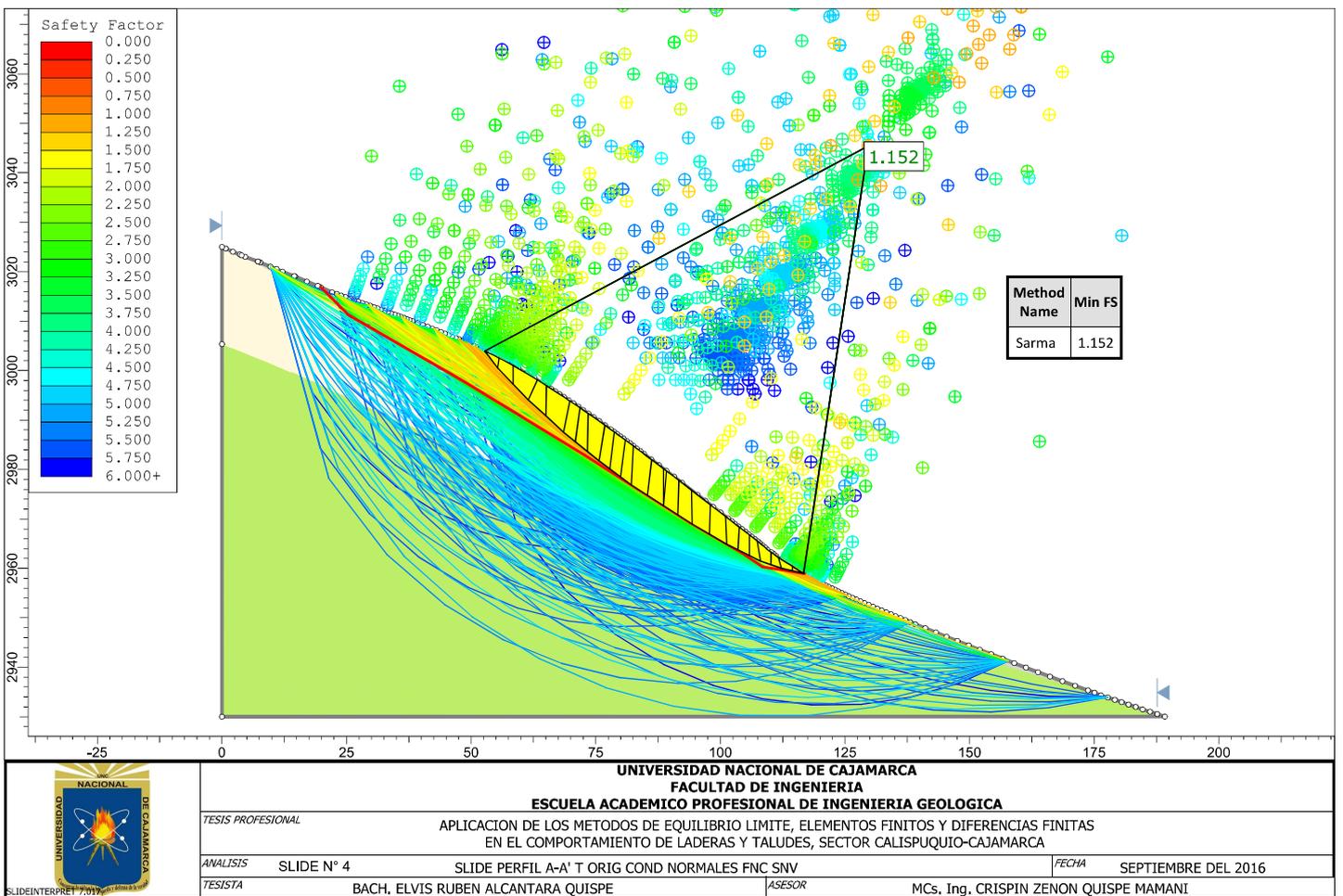
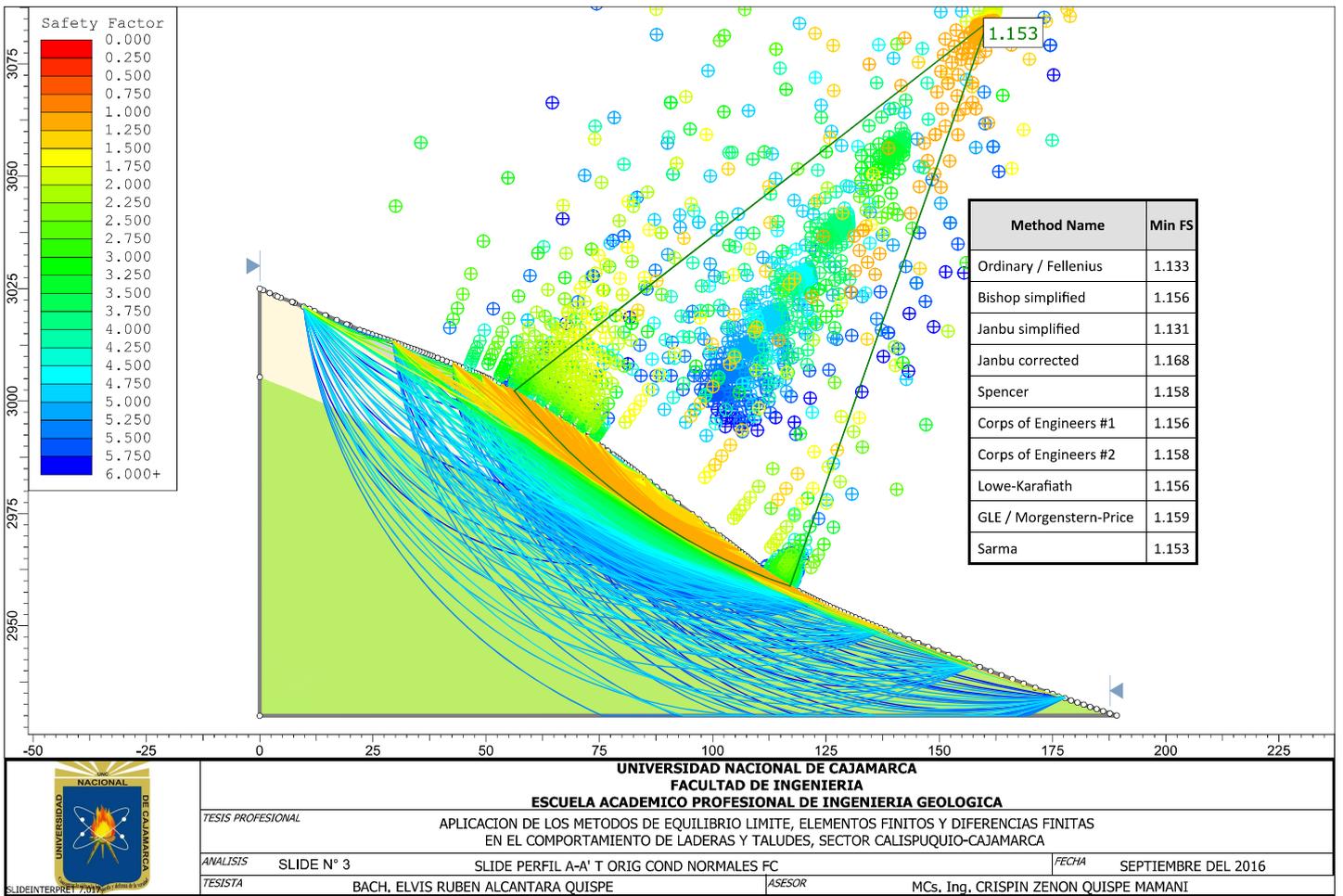
PROPIEDADES GEOMECÁNICAS - N°5: DEPÓSITOS ALUVIALES (Qh-al)							
DEPÓSITO							
Aluvial							
CLASIFICACIÓN SUCS							
GC>GM							
DENSIDAD SECA							
2100 Kg/m3							
POROSIDAD							
0.5							
DENSIDAD SATURADA							
2600 Kg/m3							
ALTURA PROMEDIO TALUDES		E: 773801, N: 9206515, Z: 2868					
100 m							
PARÁMETRO		VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	
Cohesión	c	6	KPa	Resistencia tensional	$\sigma_t$	-0.5	KPa
Ángulo de fricción	$\phi$	35	Grados	Resistencia uniaxial	$\sigma_c$	23.0518	KPa
Alfa	$\alpha$	74.8376	Grados	Módulo de Young	E	12	MPa

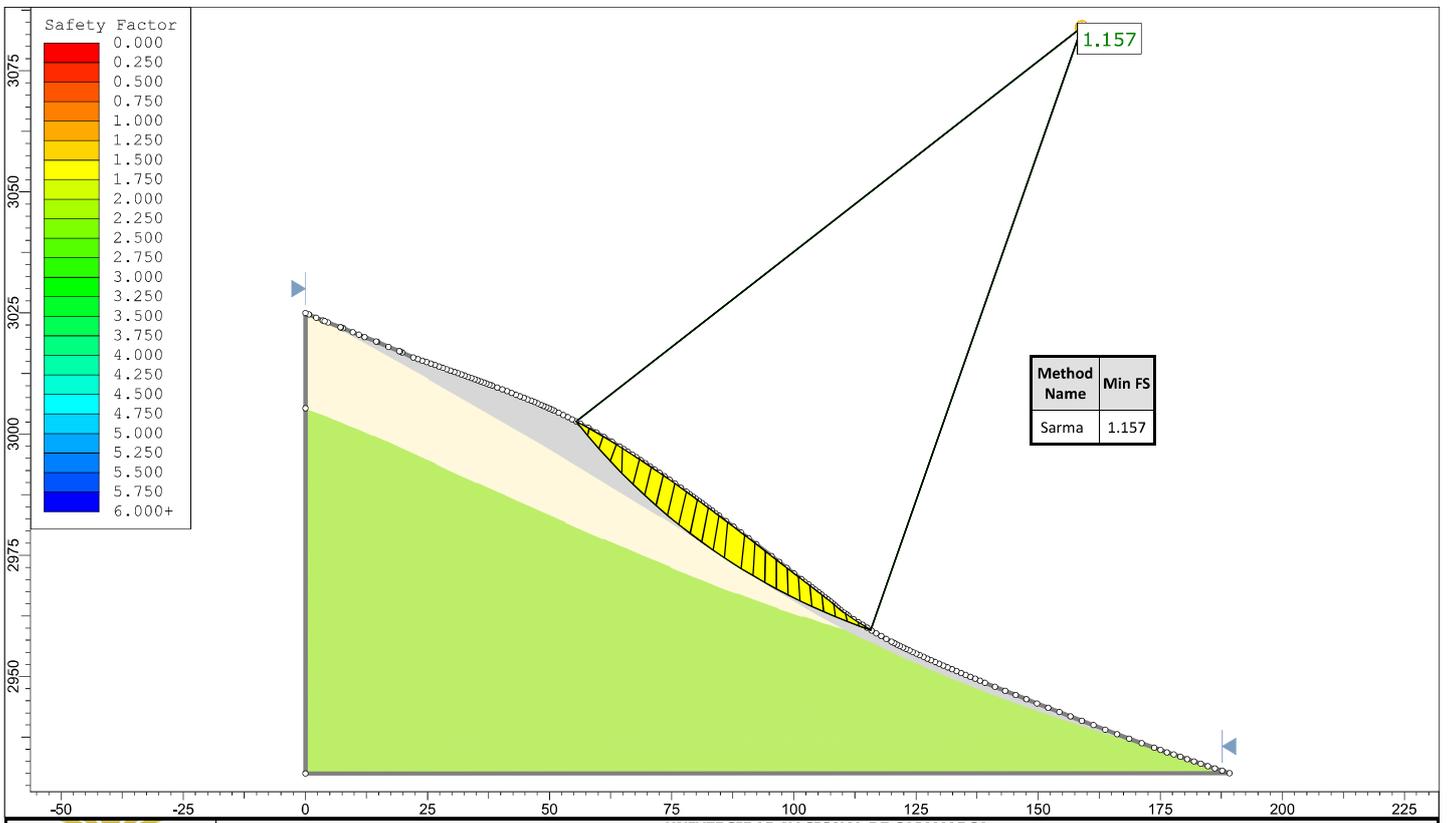
PROPIEDADES GEOMECÁNICAS - N°6: DEPÓSITOS COLUVIALES (Qh-co)							
DEPÓSITO							
Coluvial							
CLASIFICACIÓN SUCS							
GC>CH							
DENSIDAD SECA							
1800 Kg/m3							
POROSIDAD							
0.5							
DENSIDAD SATURADA							
2300 Kg/m3							
ALTURA PROMEDIO TALUDES		E: 773367, N: 9206364, Z: 2976					
100 m							
PARÁMETRO		VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	
Cohesión	c	8	KPa	Resistencia tensional	$\sigma_t$	-0.5	KPa
Ángulo de fricción	$\phi$	34	Grados	Resistencia uniaxial	$\sigma_c$	30.0916	KPa
Alfa	$\alpha$	74.2136	Grados	Módulo de Young	E	16	MPa

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS - N°7: DEPÓSITOS DELUVIALES (Qh-de)							
DEPÓSITO							
Deluvial							
CLASIFICACIÓN SUCS							
MH>CL							
DENSIDAD SECA							
1750 Kg/m3							
POROSIDAD							
0.5							
DENSIDAD SATURADA							
2000 Kg/m3							
ALTURA PROMEDIO TALUDES		E: 773630, N: 9206570, Z: 2899					
100 m							
PARÁMETRO		VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	
Cohesión	c	3	KPa	Resistencia tensional	$\sigma_t$	-0.5	KPa
Ángulo de fricción	$\phi$	25	Grados	Resistencia uniaxial	$\sigma_c$	9.41811	KPa
Alfa	$\alpha$	67.9098	Grados	Módulo de Young	E	8	MPa

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS - N°8: DEPÓSITOS COLUVIO-ALUVIALES (Qh-co/al)							
DEPÓSITO							
Coluvio/Aluvial							
CLASIFICACIÓN SUCS							
CL>GC							
DENSIDAD SECA							
1900 Kg/m3							
POROSIDAD							
0.5							
DENSIDAD SATURADA							
2400 Kg/m3							
ALTURA PROMEDIO TALUDES		E: 773444, N: 9206458, Z: 2933					
100 m							
PARÁMETRO		VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	
Cohesión	c	6	KPa	Resistencia tensional	$\sigma_t$	-0.5	KPa
Ángulo de fricción	$\phi$	30	Grados	Resistencia uniaxial	$\sigma_c$	20.7846	KPa
Alfa	$\alpha$	71.5651	Grados	Módulo de Young	E	14	MPa





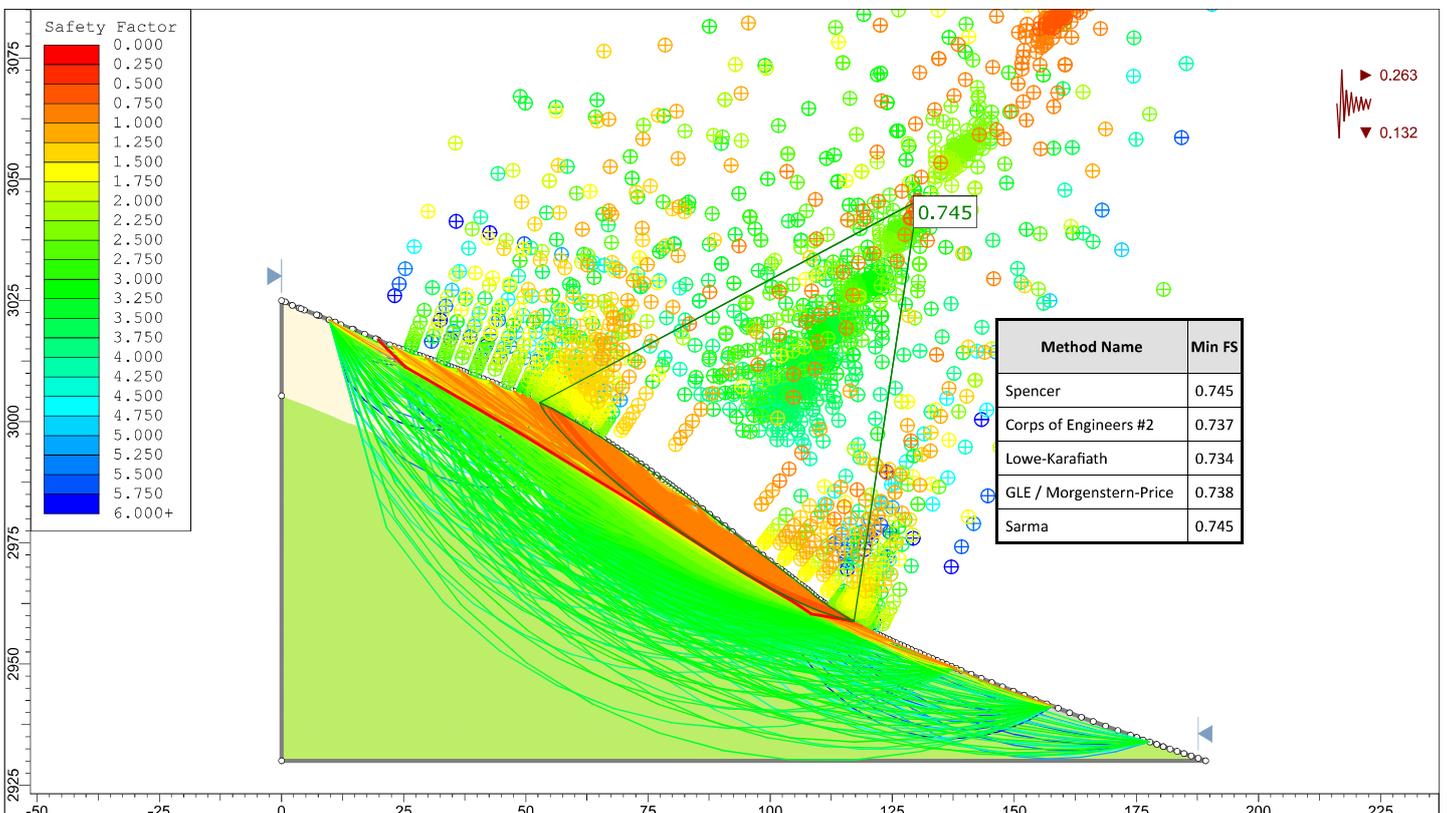


Method Name	Min FS
Sarma	1.157

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS	SLIDE N° 5	SLIDE PERFIL A-A' T ORIG COND NORMALES FC SNV	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

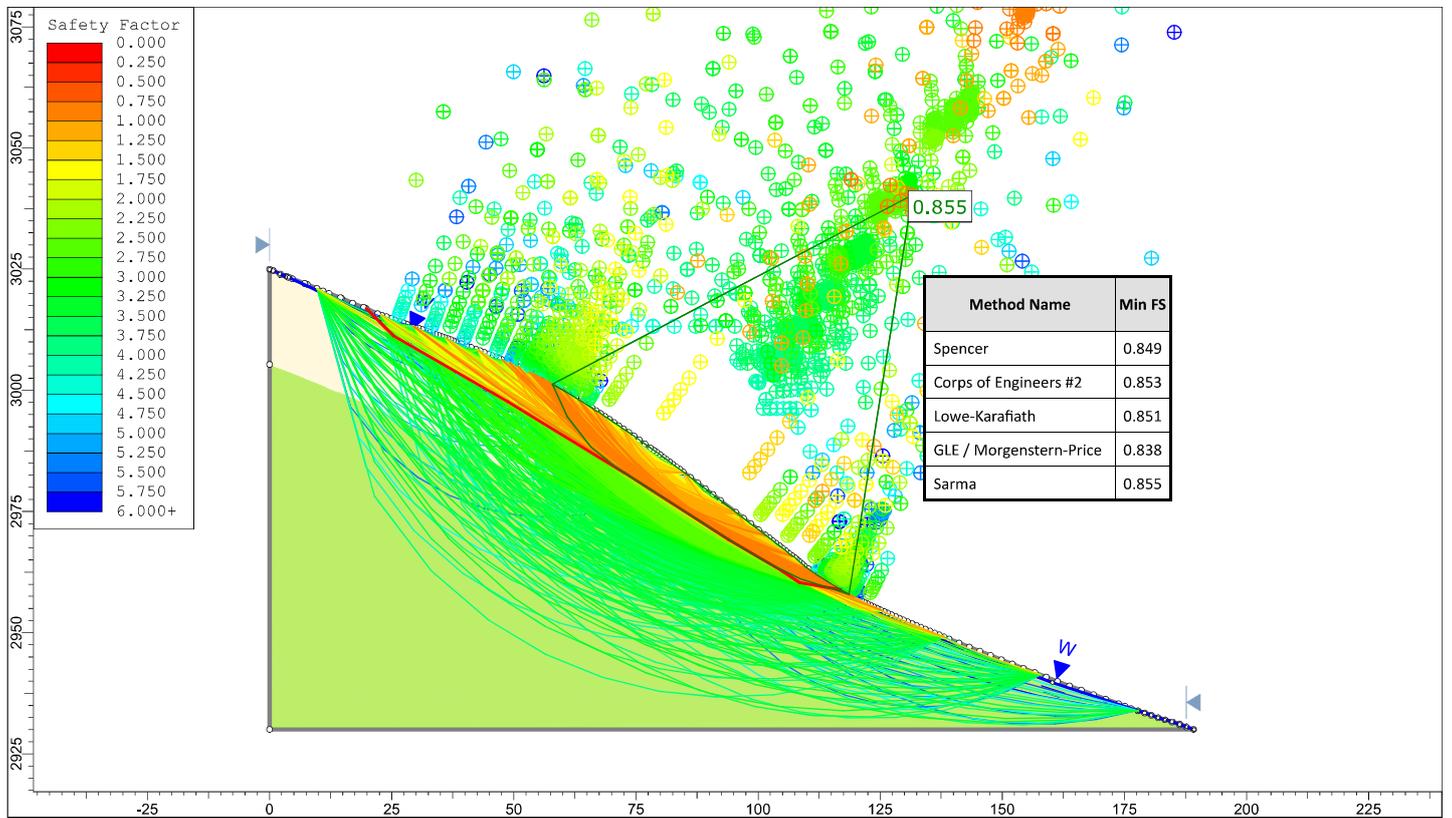


Method Name	Min FS
Spencer	0.745
Corps of Engineers #2	0.737
Lowe-Karafiath	0.734
GLE / Morgenstern-Price	0.738
Sarma	0.745

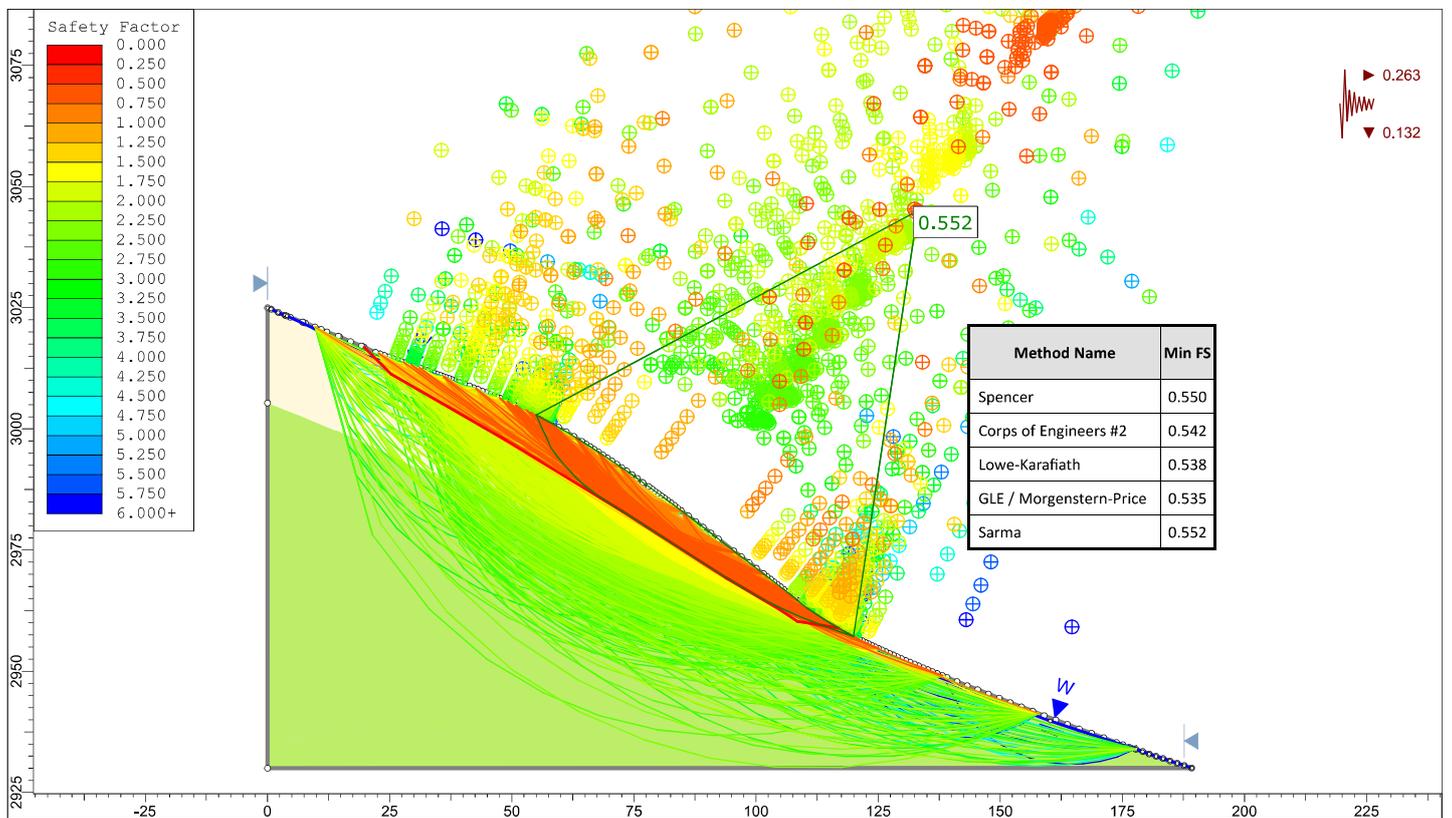
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

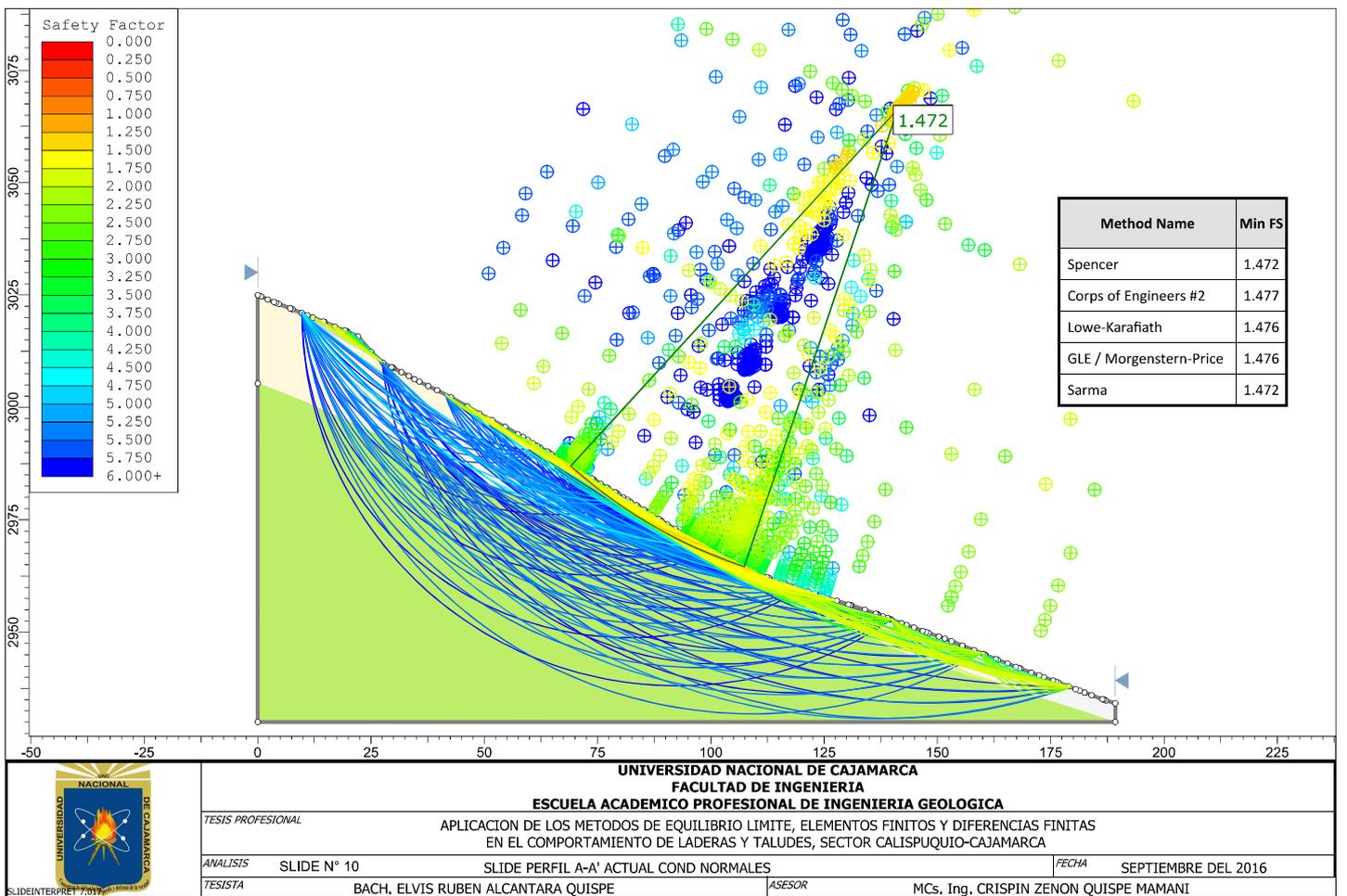
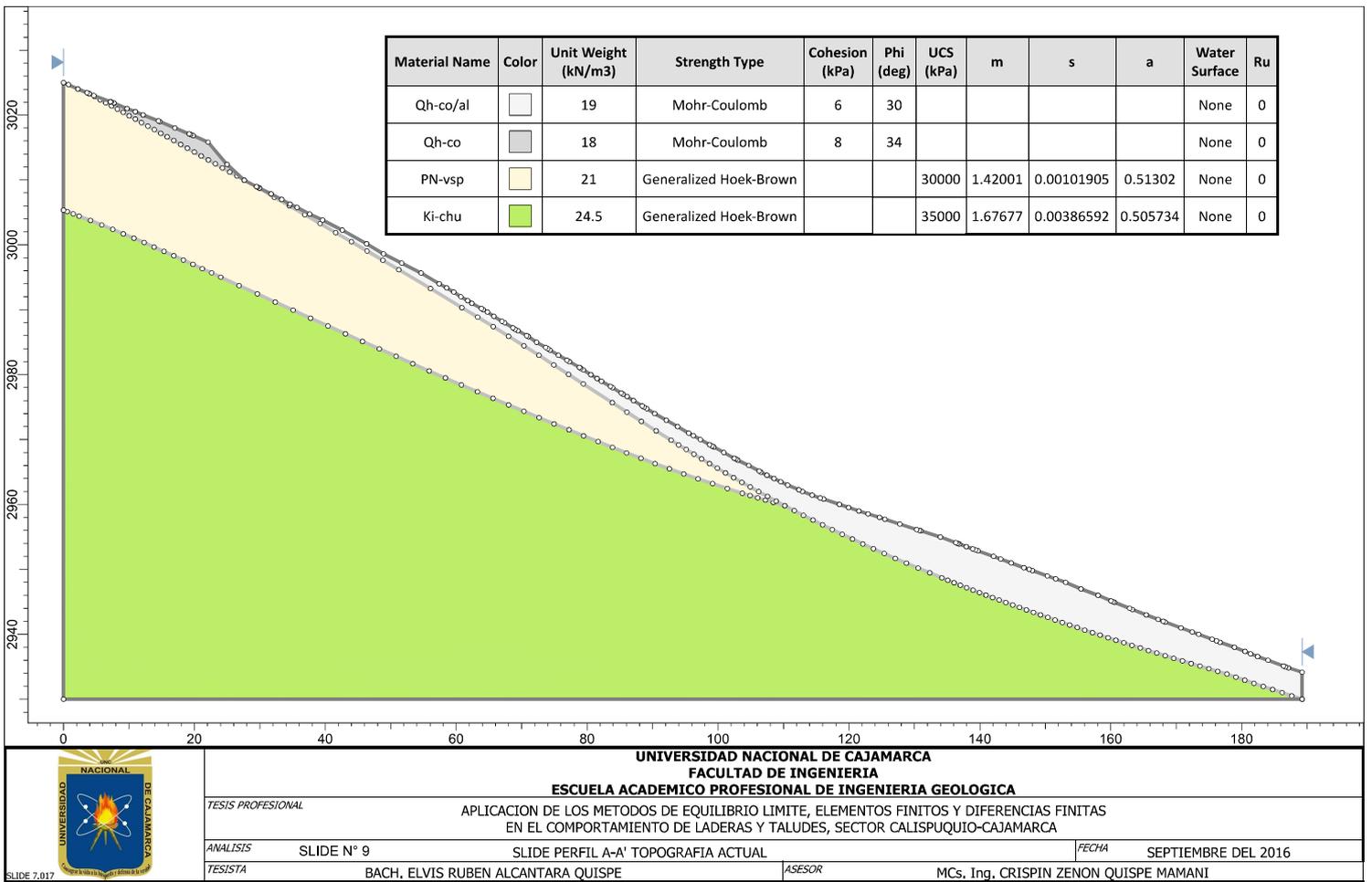
ANALISIS	SLIDE N° 6	SLIDE PERFIL A-A' T ORIG SIS MAX	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

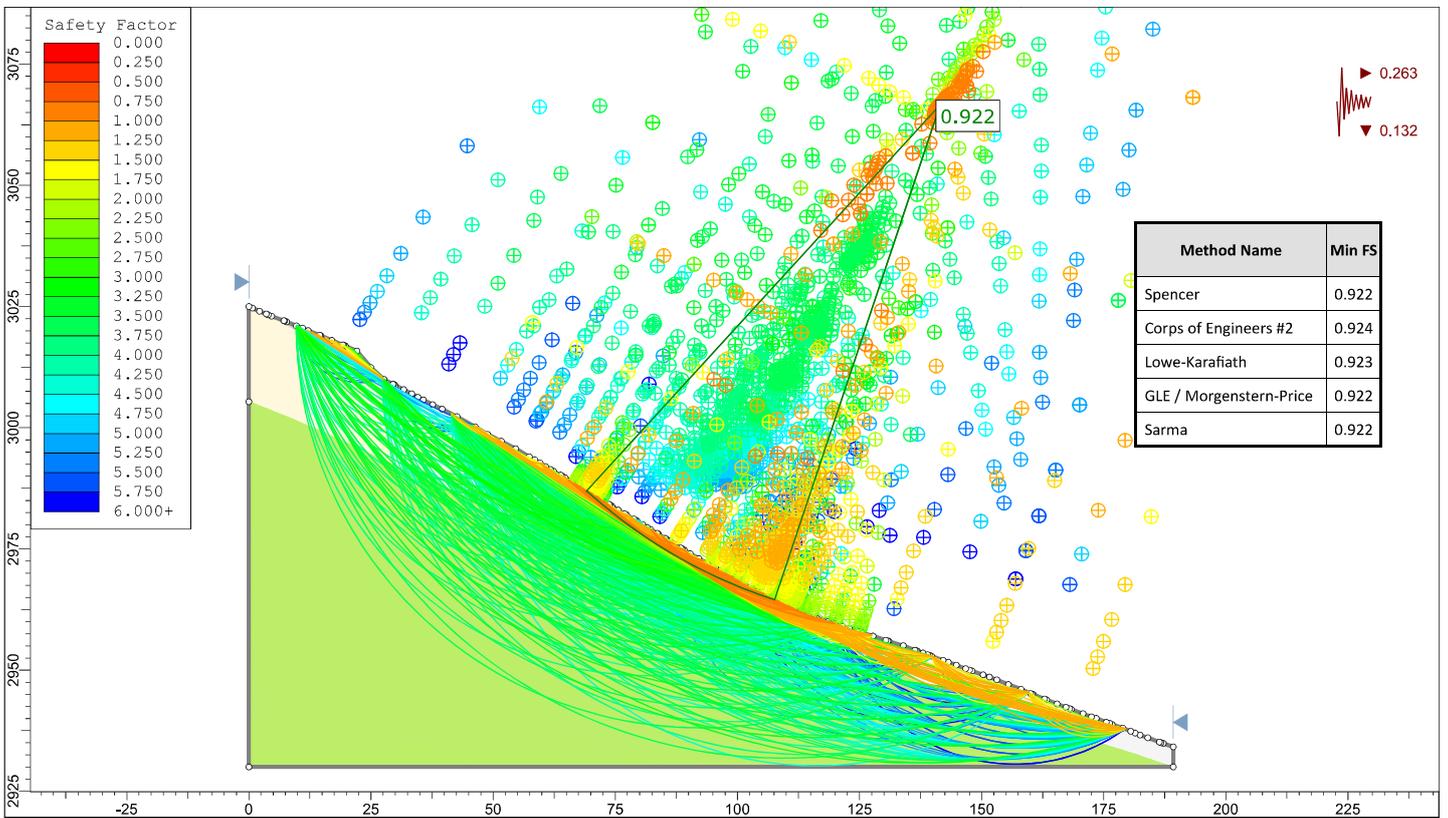


	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISTA	SLIDE N° 7	SLIDE PERFIL A-A' T ORIG SAT MED FNC	FECHA
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI
			SEPTIEMBRE DEL 2016



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISTA	SLIDE N° 8	SLIDE PERFIL A-A' T ORIG SIS MAX Y SAT MED FNC	FECHA
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI
			SEPTIEMBRE DEL 2016

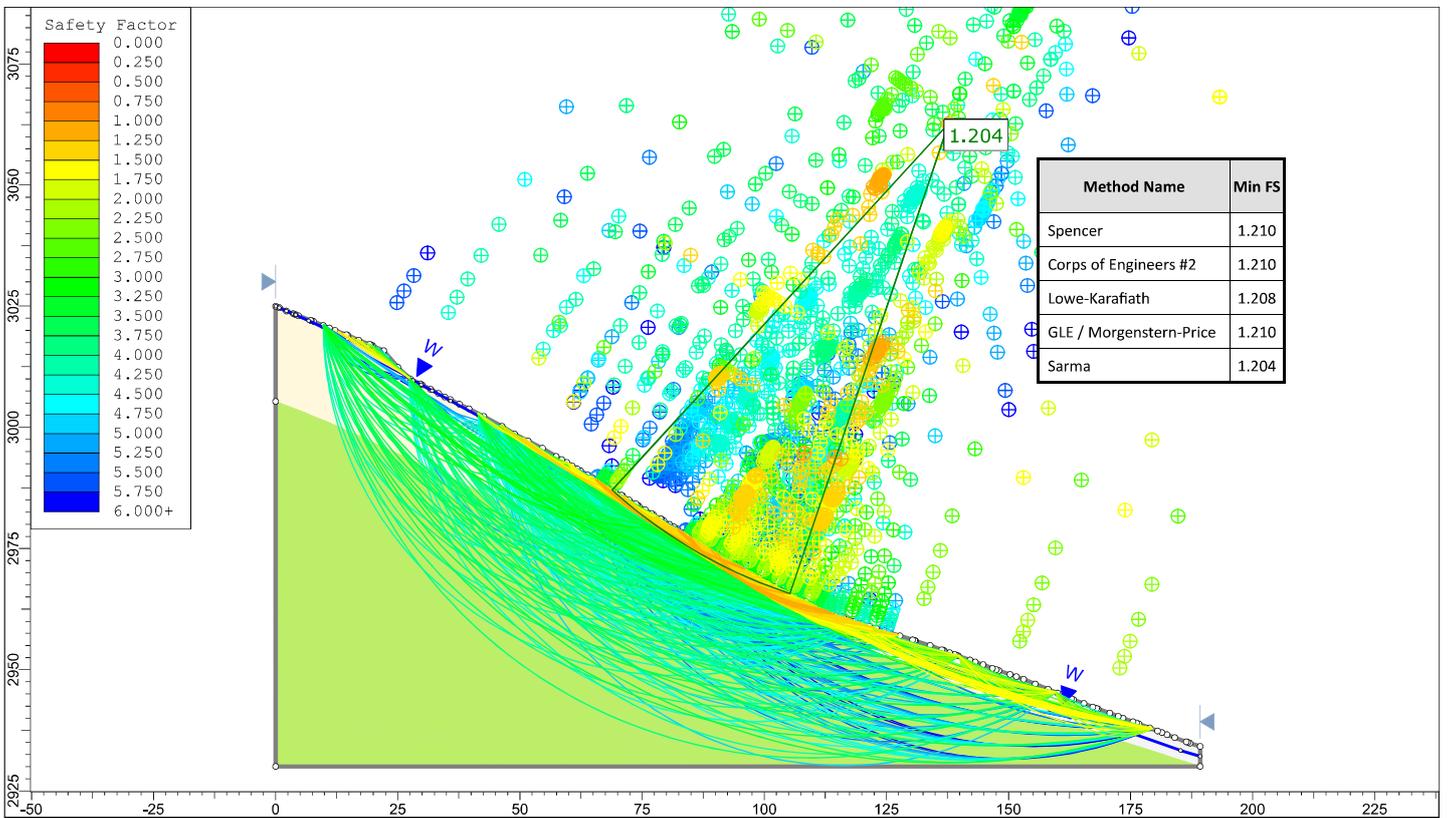




**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

*TESIS PROFESIONAL*  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

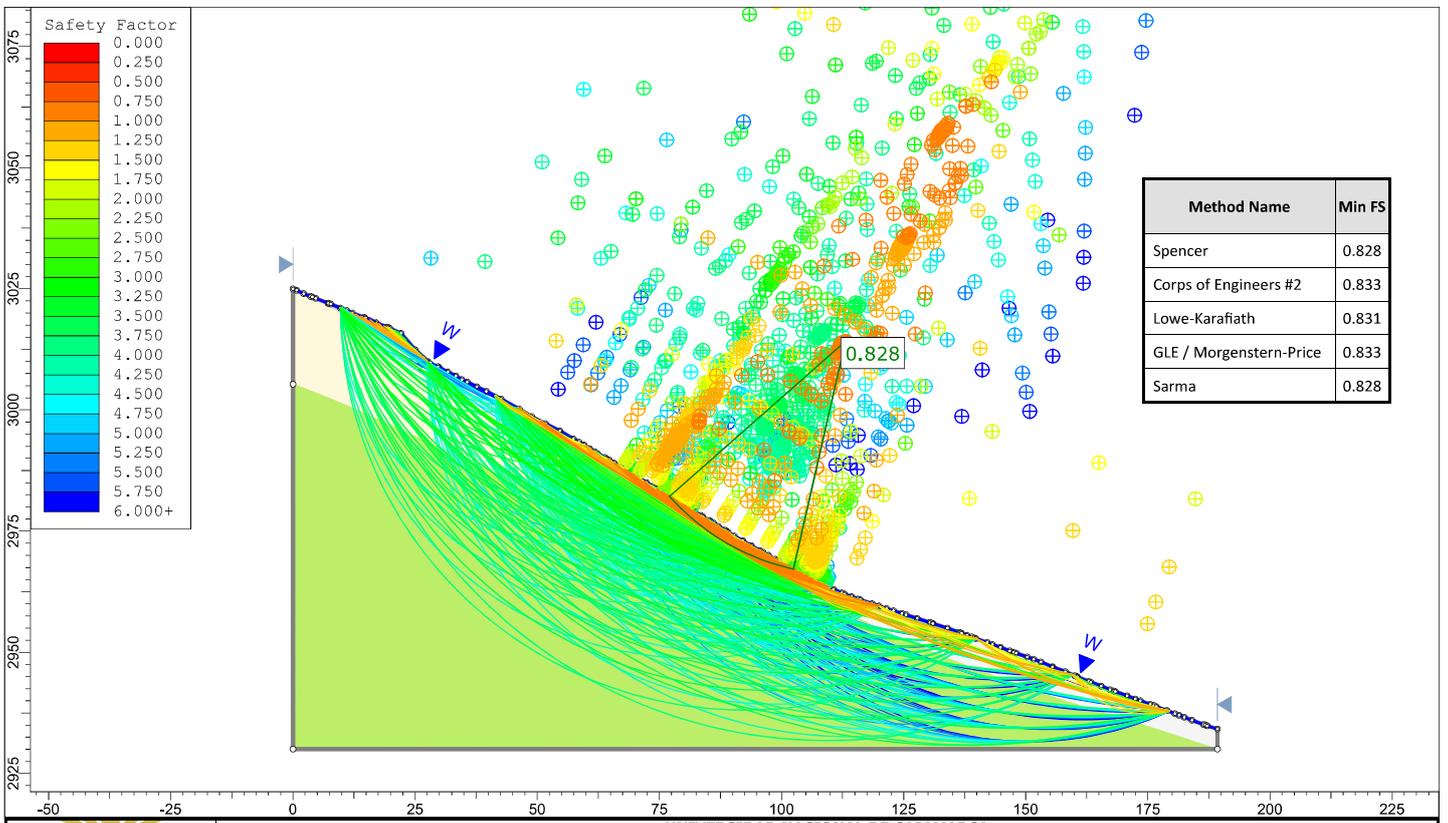
<i>ANALISTA</i>	SLIDE N° 11	SLIDE PERFIL A-A' ACTUAL SIS MAX	<i>FECHA</i>	SEPTIEMBRE DEL 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		<i>ASESOR</i>	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

*TESIS PROFESIONAL*  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

<i>ANALISTA</i>	SLIDE N° 12	SLIDE PERFIL A-A' ACTUAL SAT MED	<i>FECHA</i>	SEPTIEMBRE DEL 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		<i>ASESOR</i>	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



Method Name	Min FS
Spencer	0.828
Corps of Engineers #2	0.833
Low-Karafiath	0.831
GLE / Morgenstern-Price	0.833
Sarma	0.828



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

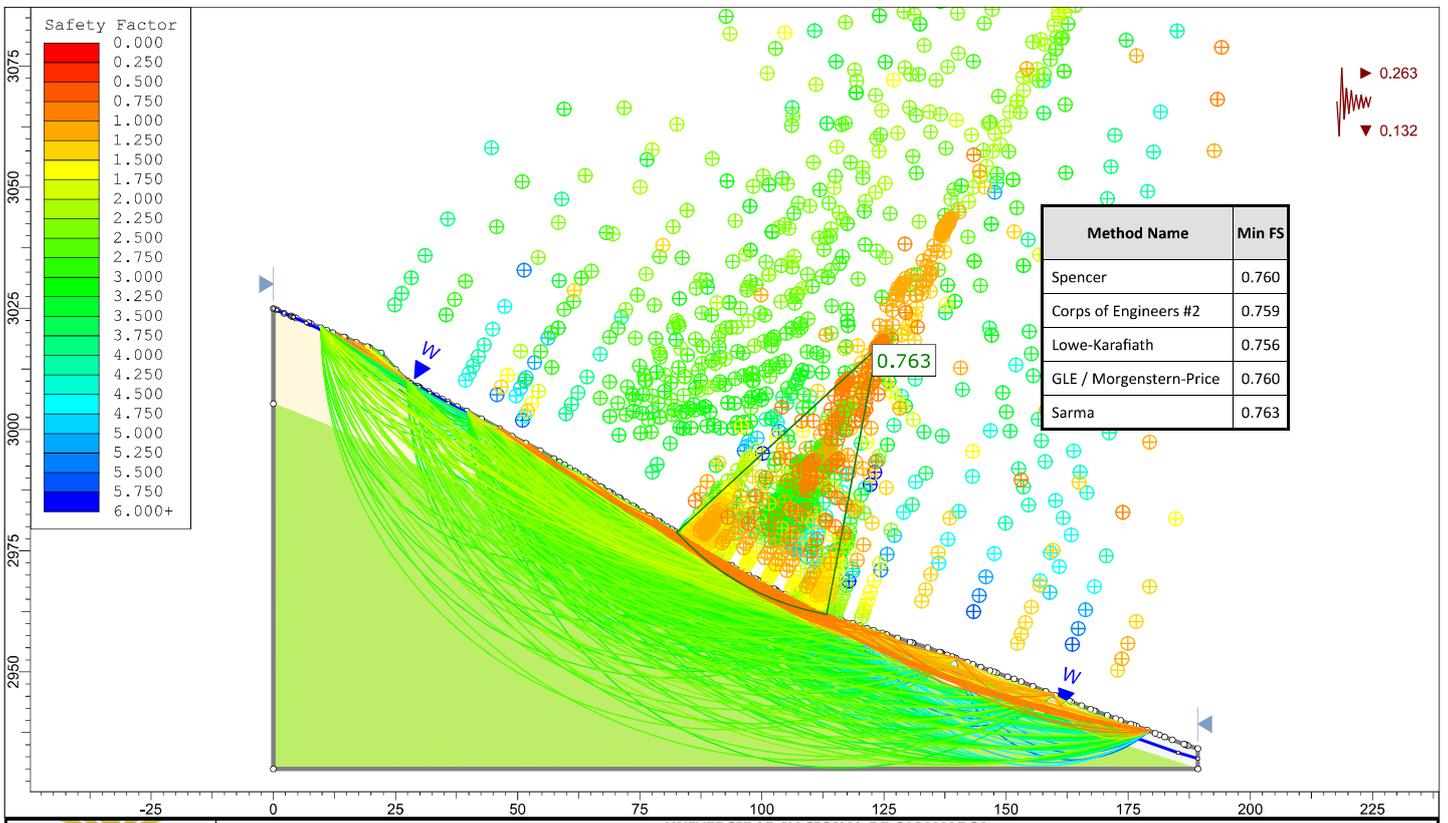
---

*TESIS PROFESIONAL*

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

---

<i>ANALISIS</i>	SLIDE N° 13	SLIDE PERFIL A-A' ACTUAL SAT TOT	<i>FECHA</i>	SEPTIEMBRE DEL 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	<i>ASESOR</i>	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI	



Method Name	Min FS
Spencer	0.760
Corps of Engineers #2	0.759
Low-Karafiath	0.756
GLE / Morgenstern-Price	0.760
Sarma	0.763



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

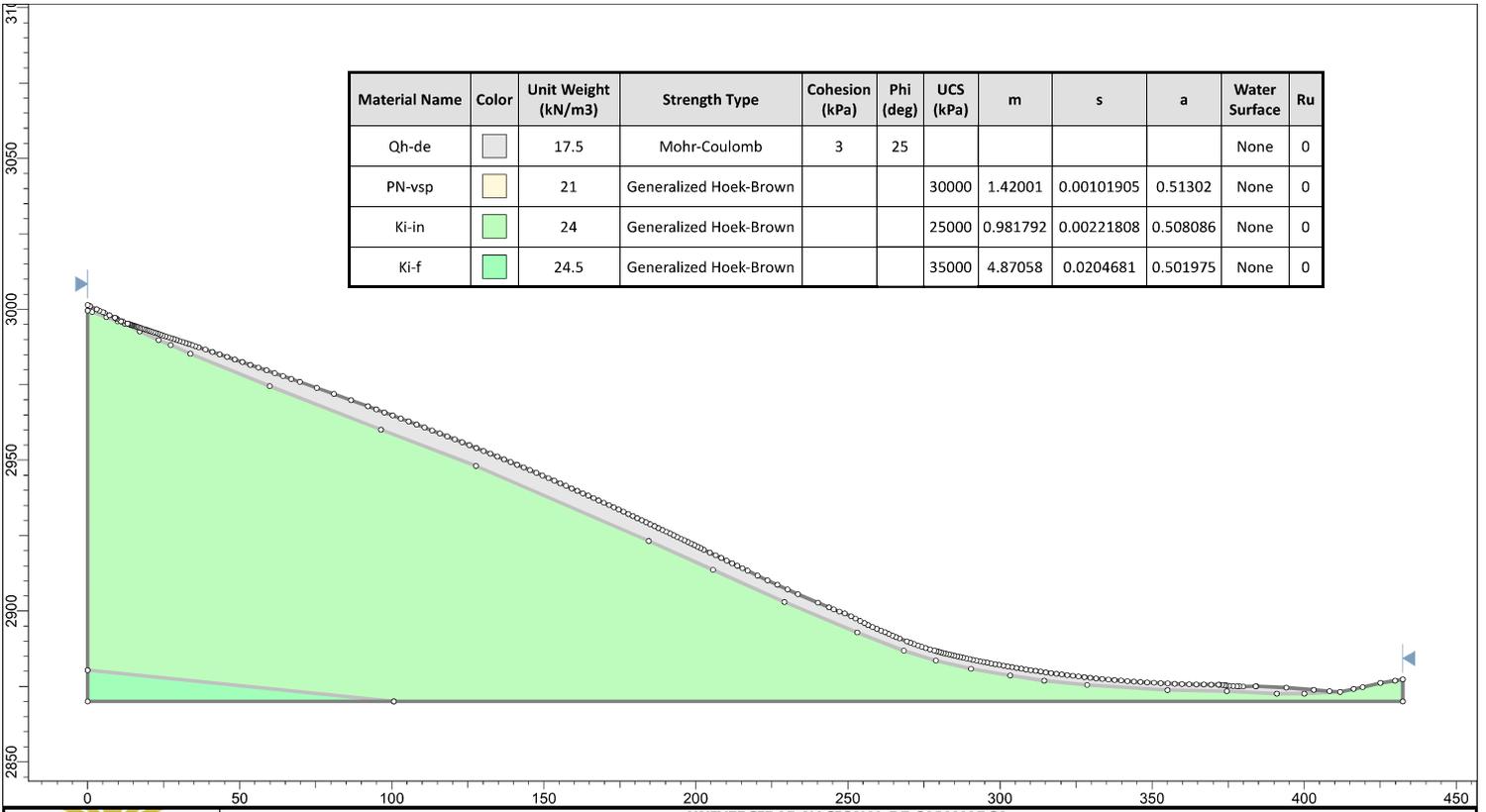
---

*TESIS PROFESIONAL*

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

---

<i>ANALISIS</i>	SLIDE N° 14	SLIDE PERFIL A-A' ACTUAL SIS MAX Y SAT MED	<i>FECHA</i>	SEPTIEMBRE DEL 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	<i>ASESOR</i>	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI	



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

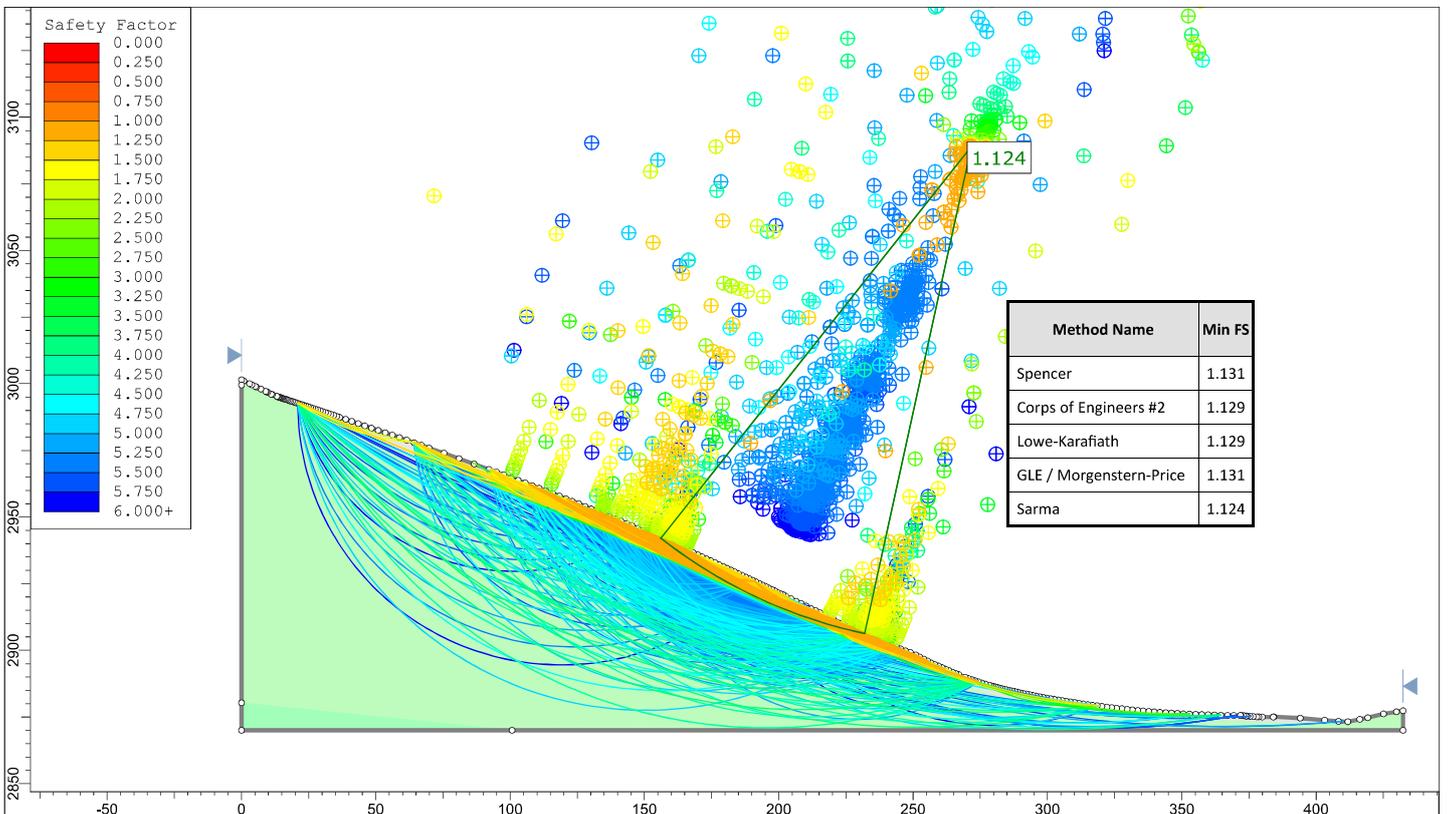
---

*TESIS PROFESIONAL*

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

---

<i>ANALISIS</i>	SLIDE N° 15	SLIDE PERFIL B-B' TOPOGRAFIA ORIGINAL	<i>FECHA</i>	SEPTIEMBRE DEL 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	<i>ASESOR</i>	MCS. ING. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI	



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

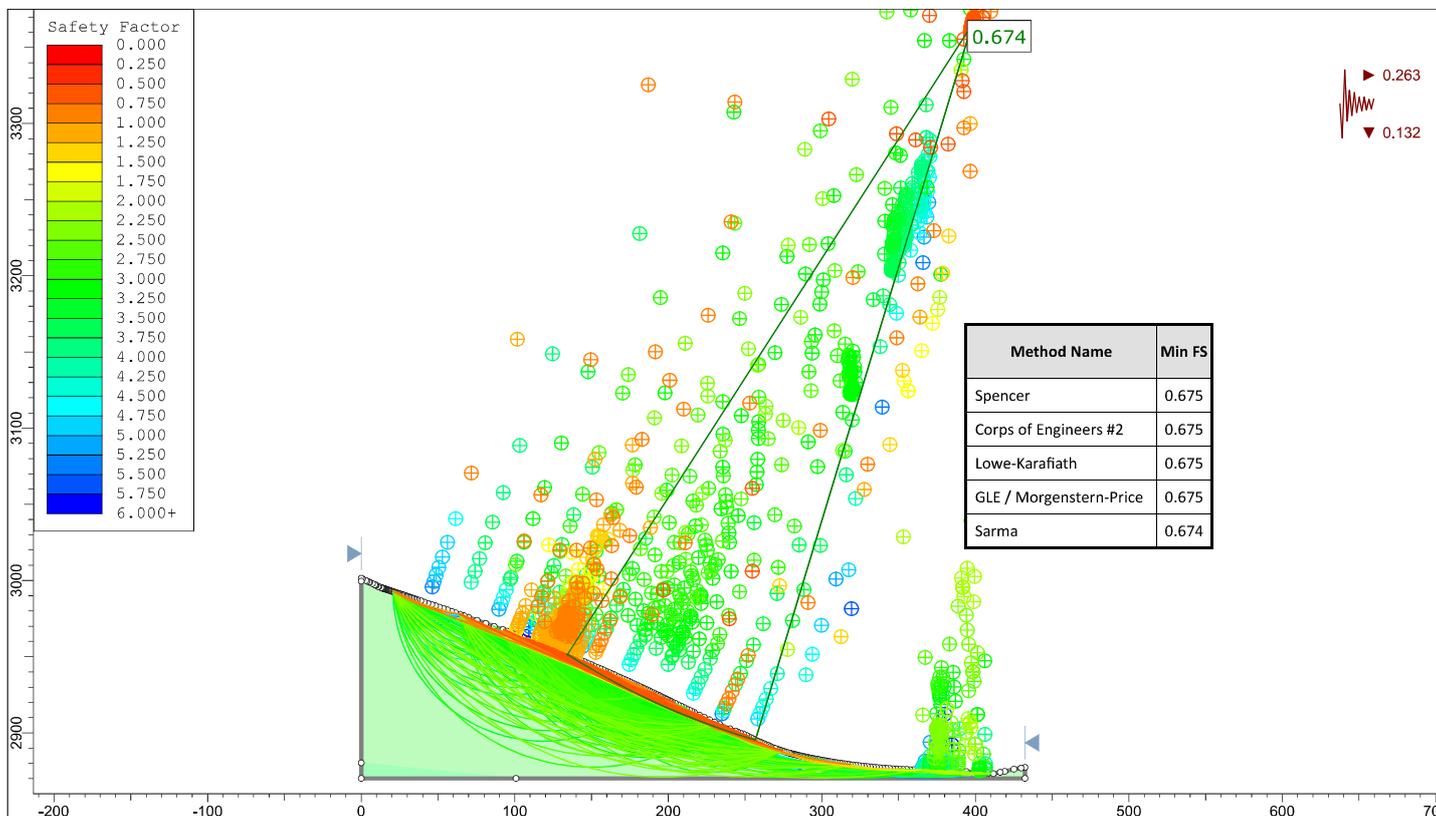
---

*TESIS PROFESIONAL*

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

---

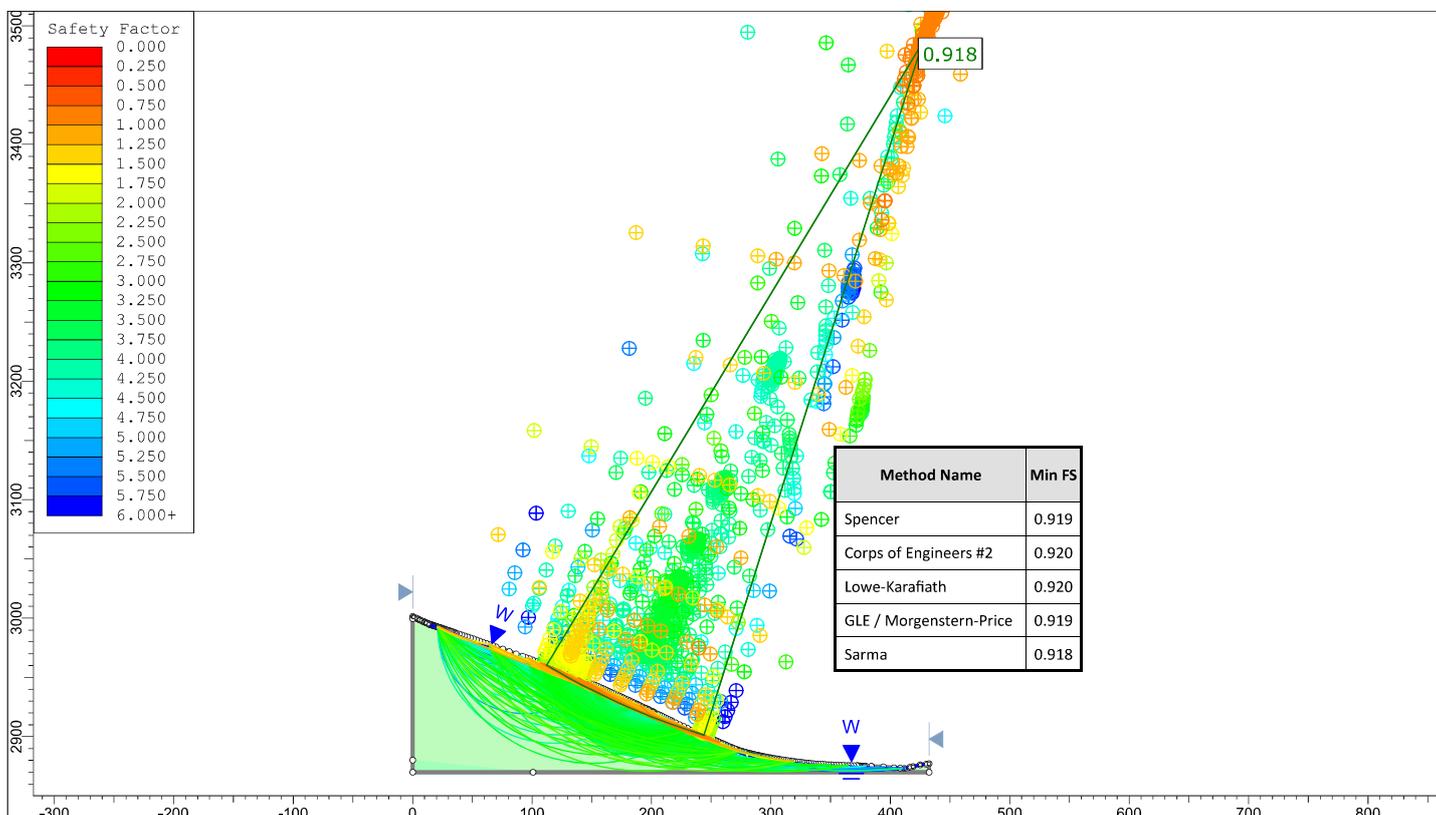
<i>ANALISIS</i>	SLIDE N° 16	SLIDE PERFIL B-B' ORG COND NORMALES	<i>FECHA</i>	SEPTIEMBRE DEL 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	<i>ASESOR</i>	MCS. ING. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI	



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

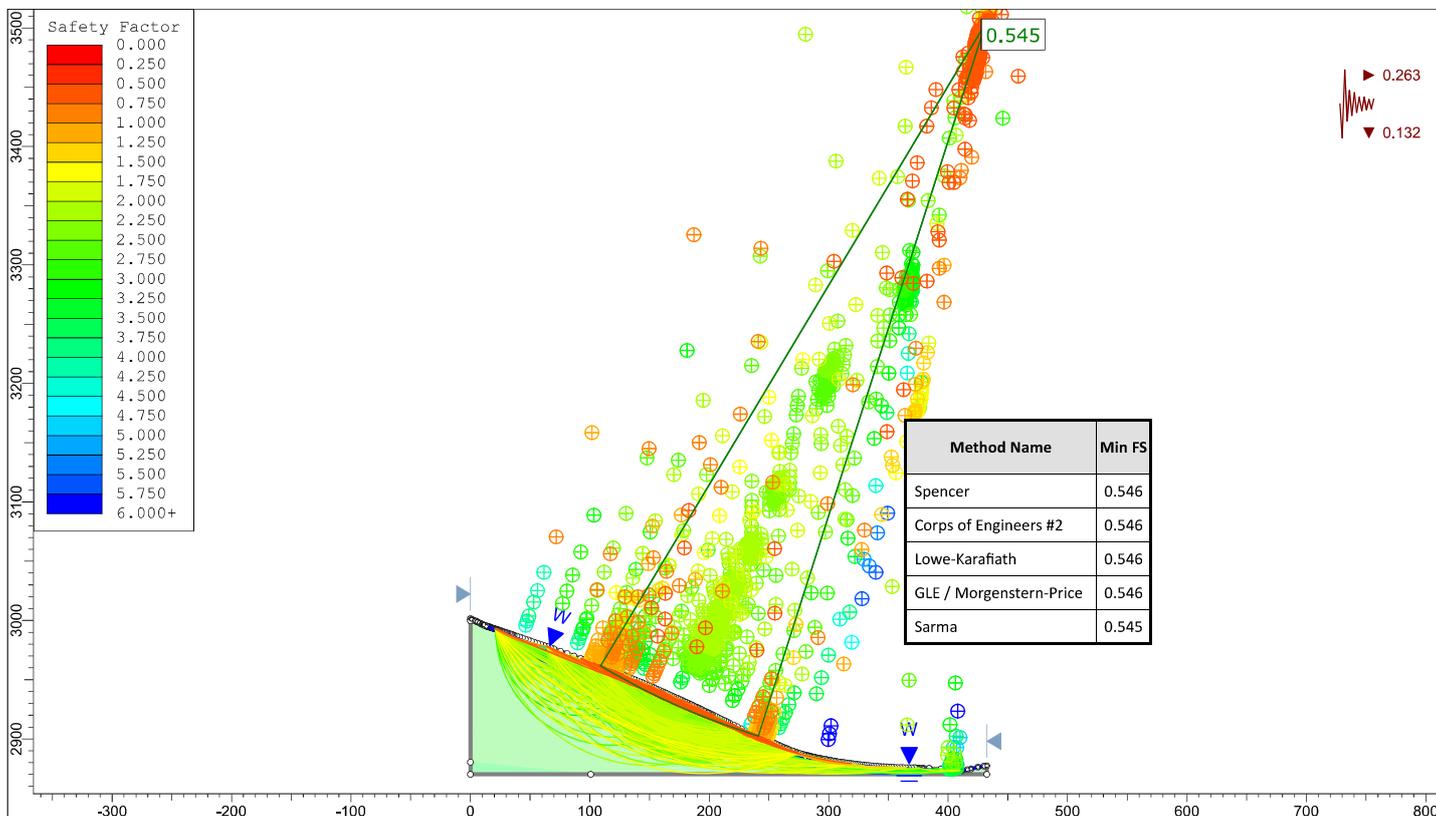
ANALISIS	SLIDE N° 17	SLIDE PERFIL B-B' ORG SIS MAX	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

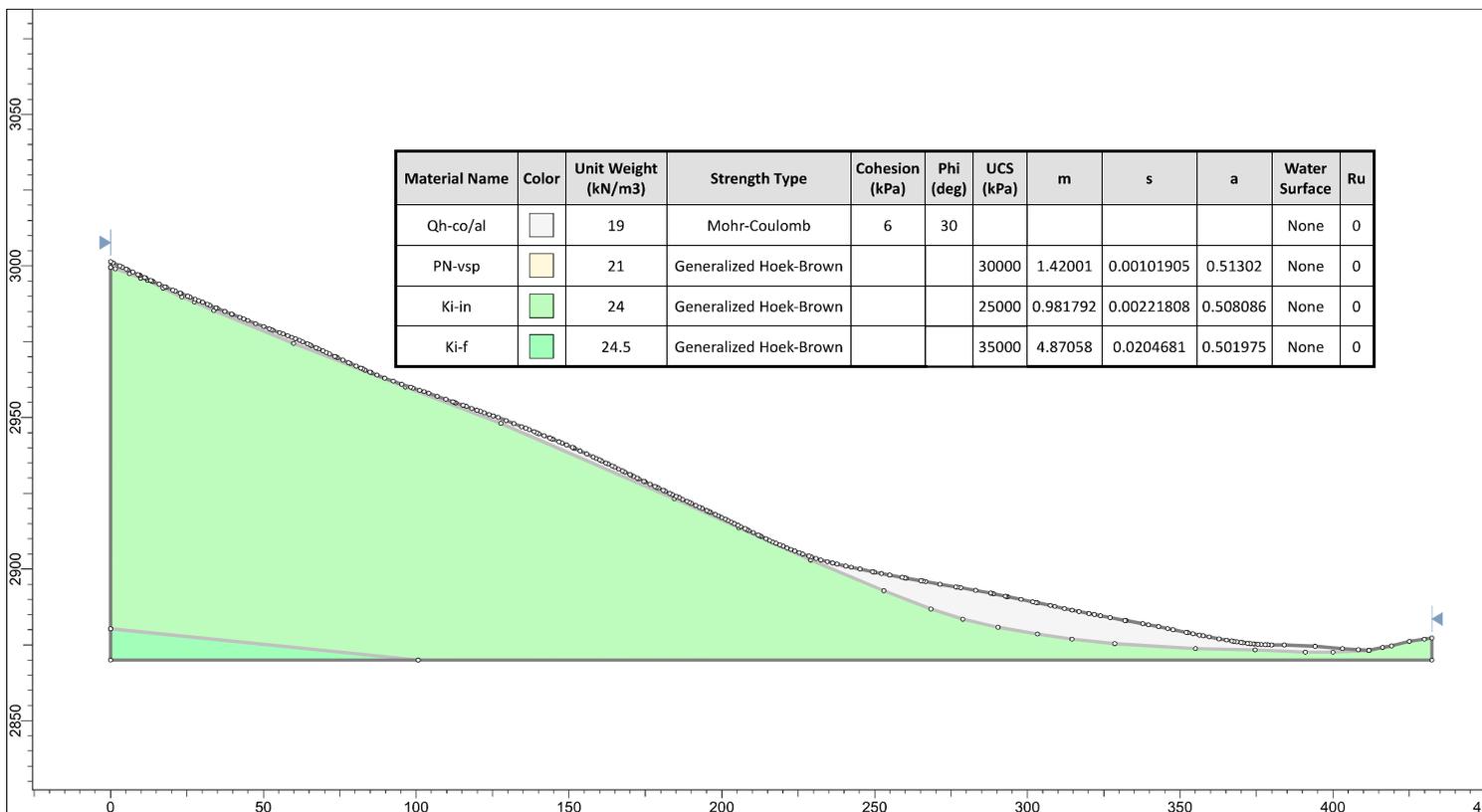
ANALISIS	SLIDE N° 18	SLIDE PERFIL B-B' ORG SAT MED	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

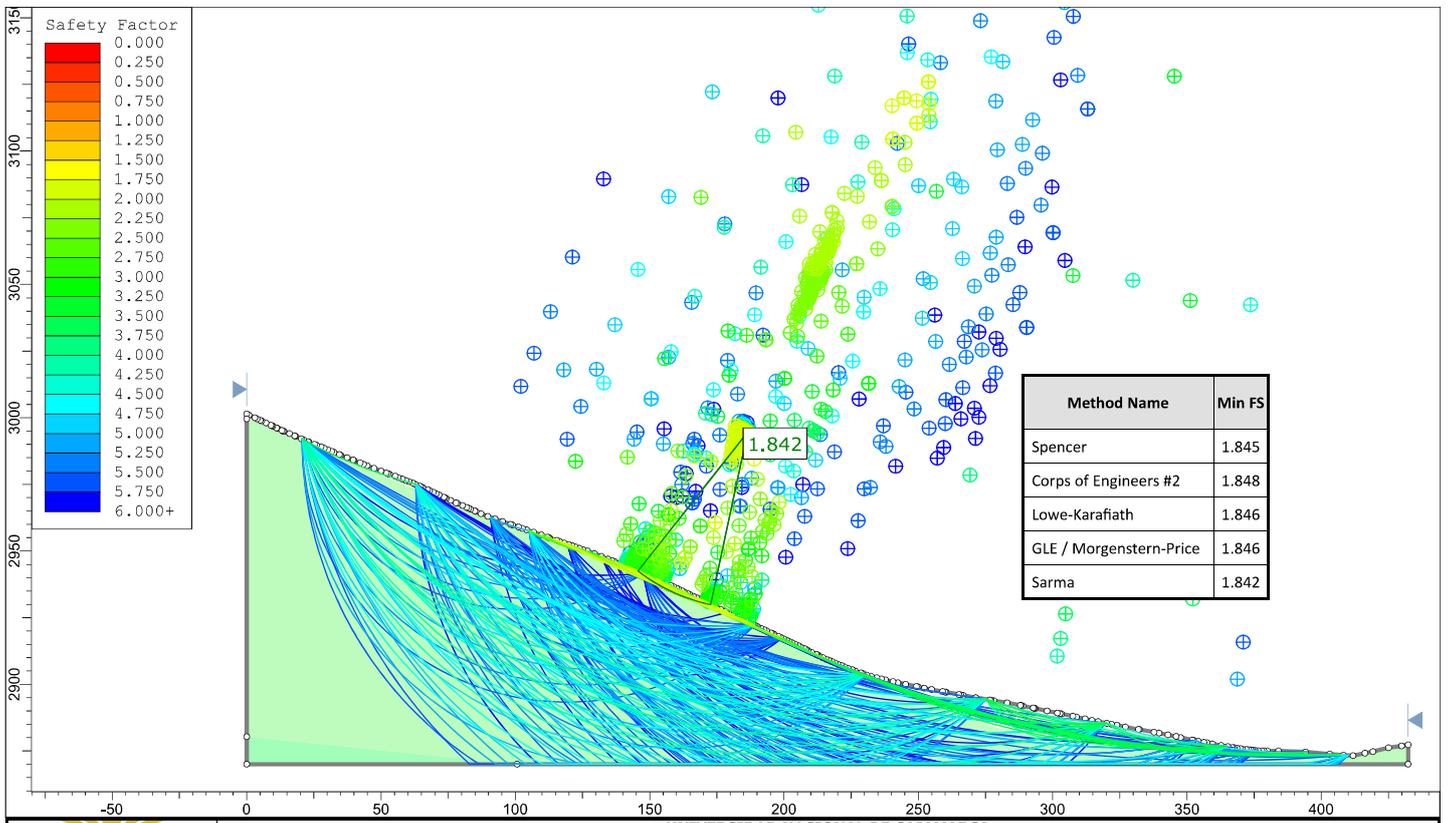
ANALISIS	SLIDE N° 19	SLIDE PERFIL B-B' ORG SIS MAX Y SAT MED	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS	SLIDE N° 20	SLIDE PERFIL B-B' TOPOGRAFIA ACTUAL	FECHA	SEPTIEMBRE 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI





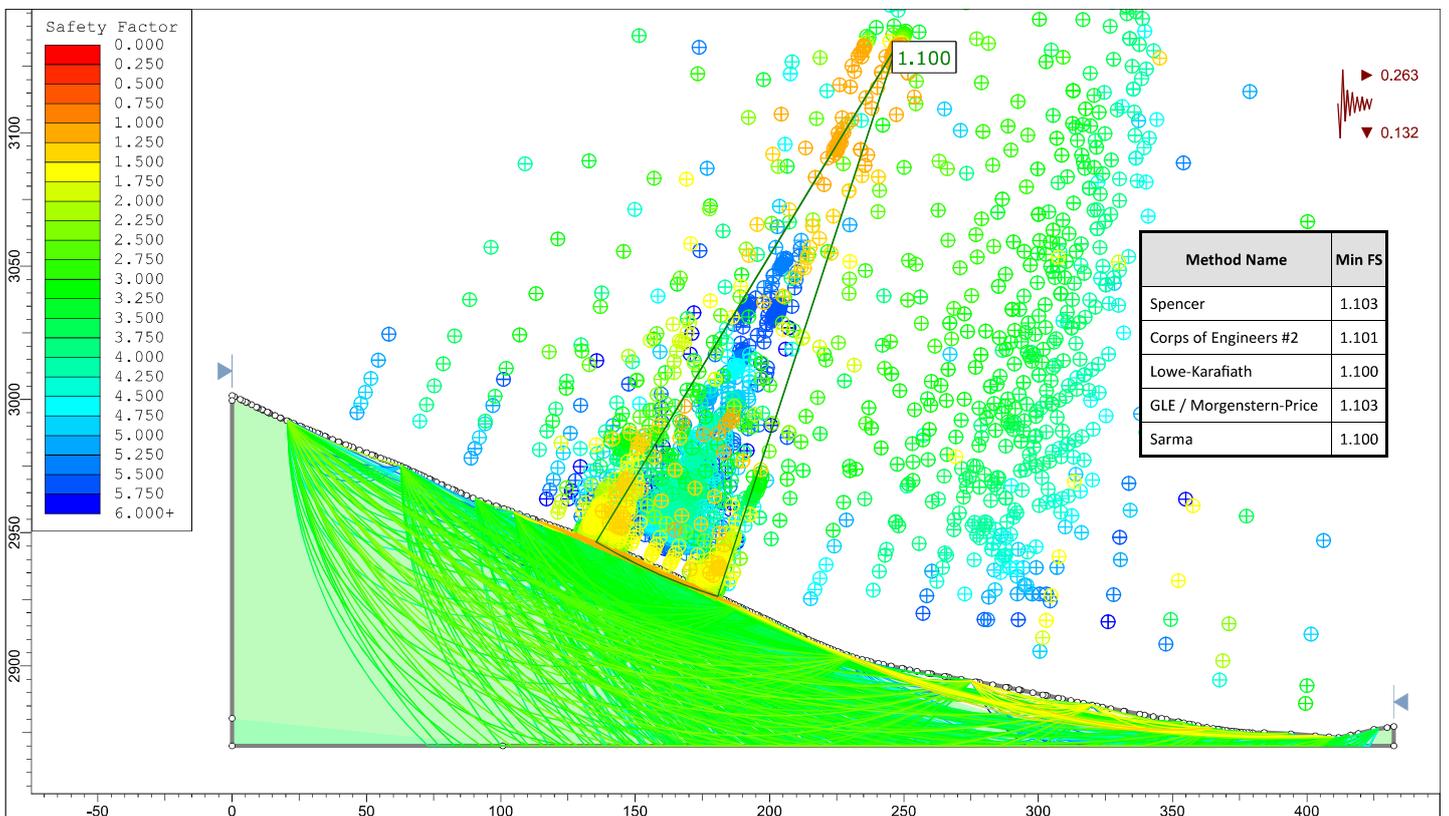
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

---

*TESIS PROFESIONAL*

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

<i>ANALISTAS</i>	SLIDE N° 21	SLIDE PERFIL B-B' ACT COND NORMALES	<i>FECHA</i>	SEPTIEMBRE 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	<i>ASESOR</i>	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI	





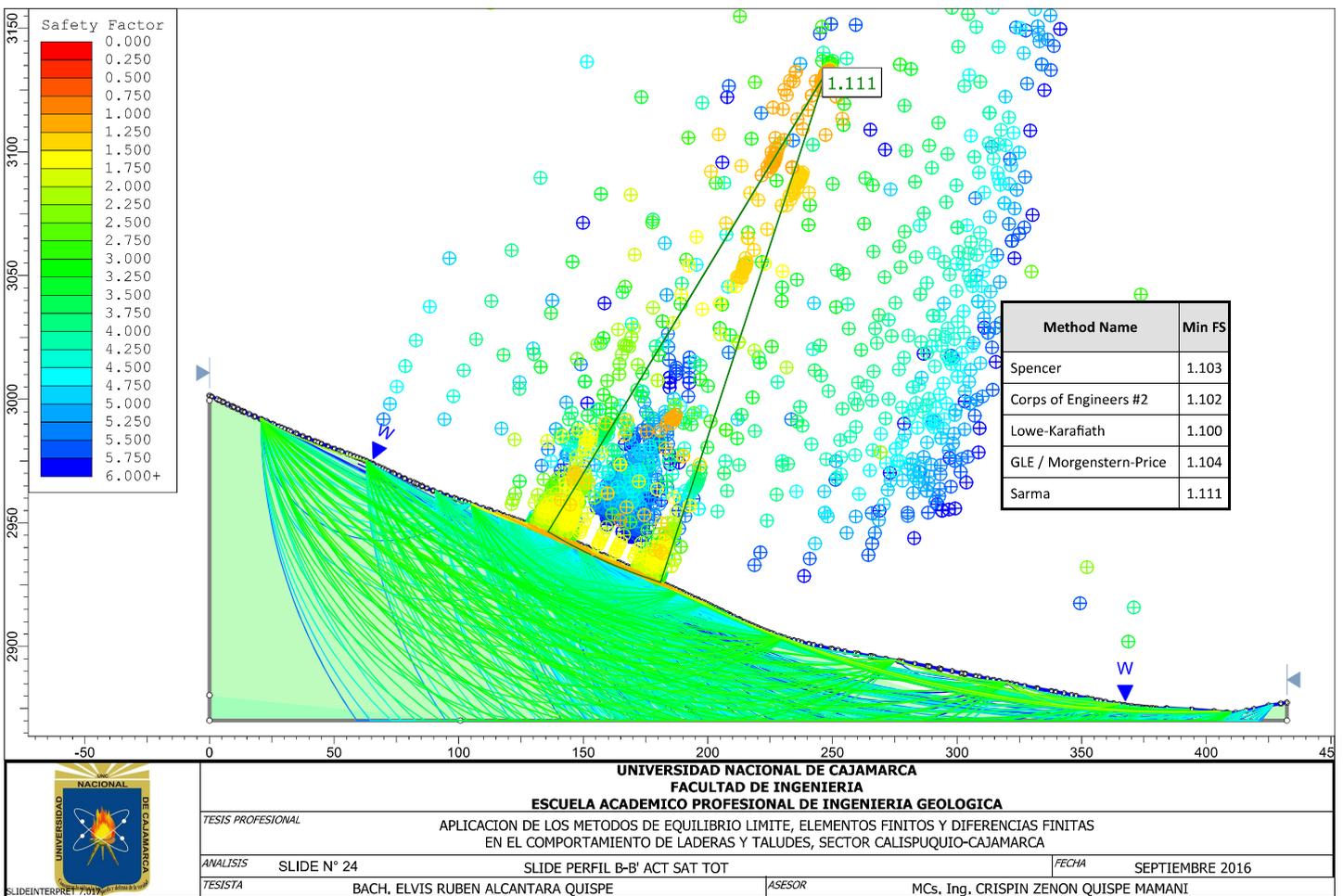
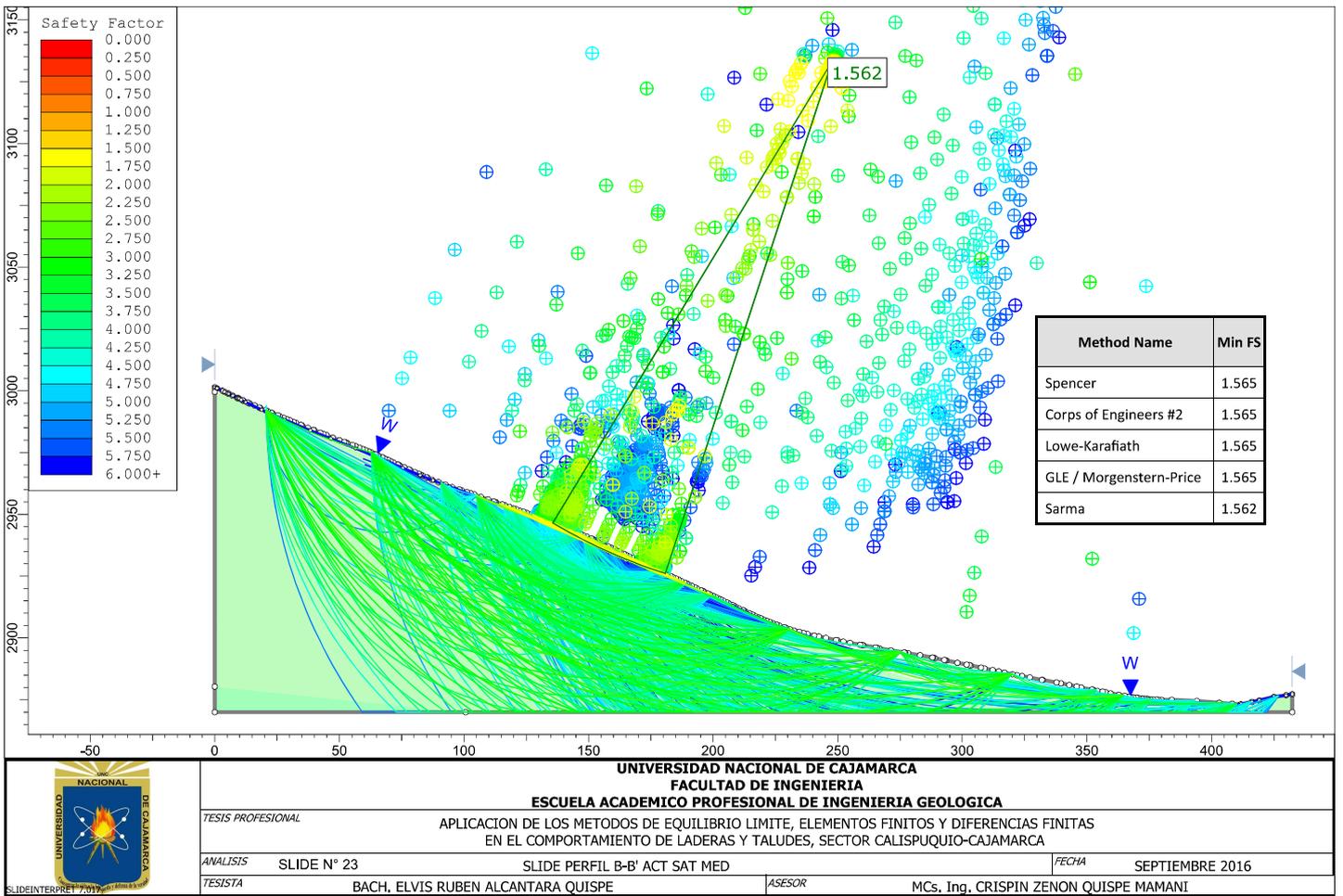
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

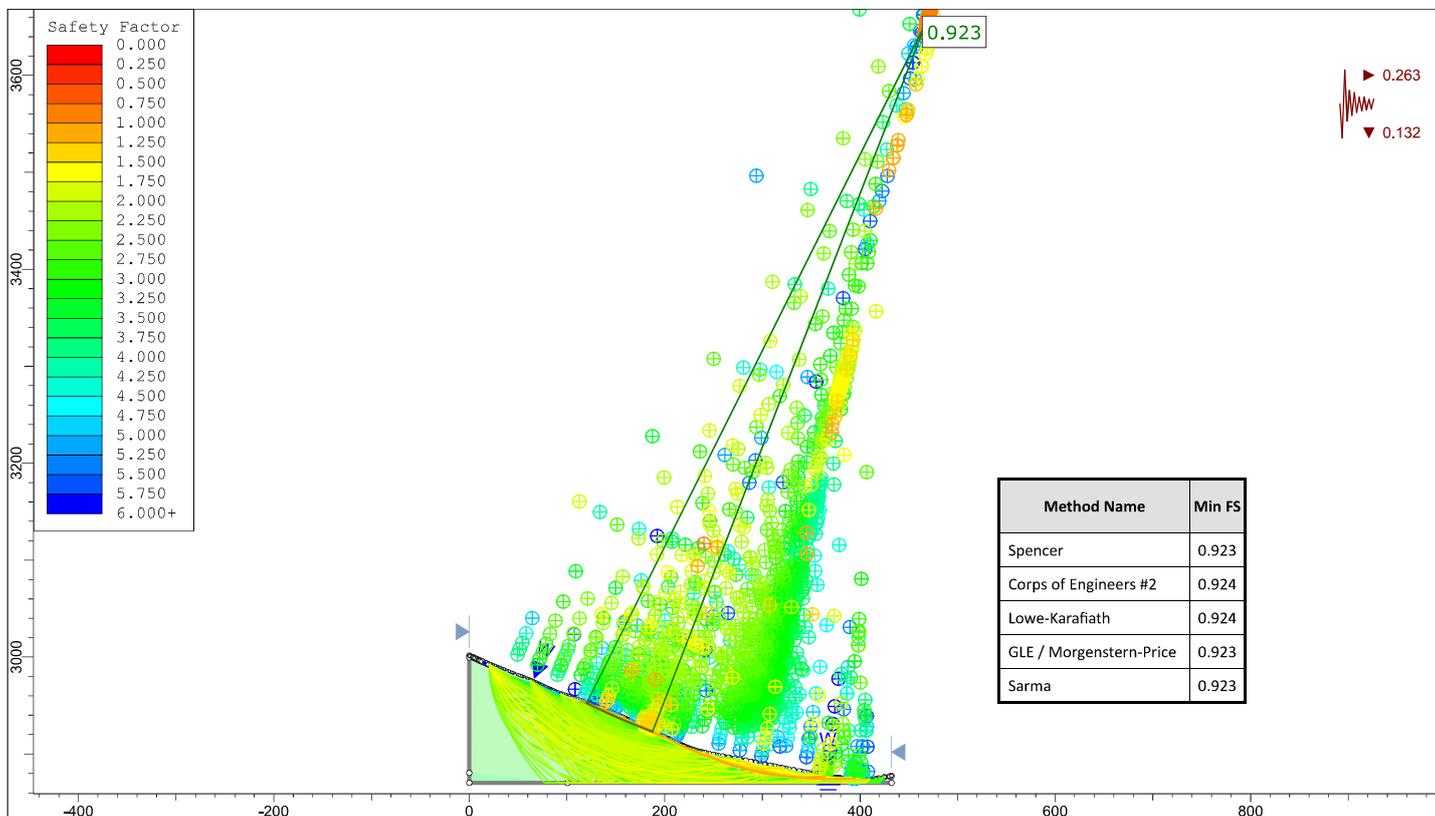
---

*TESIS PROFESIONAL*

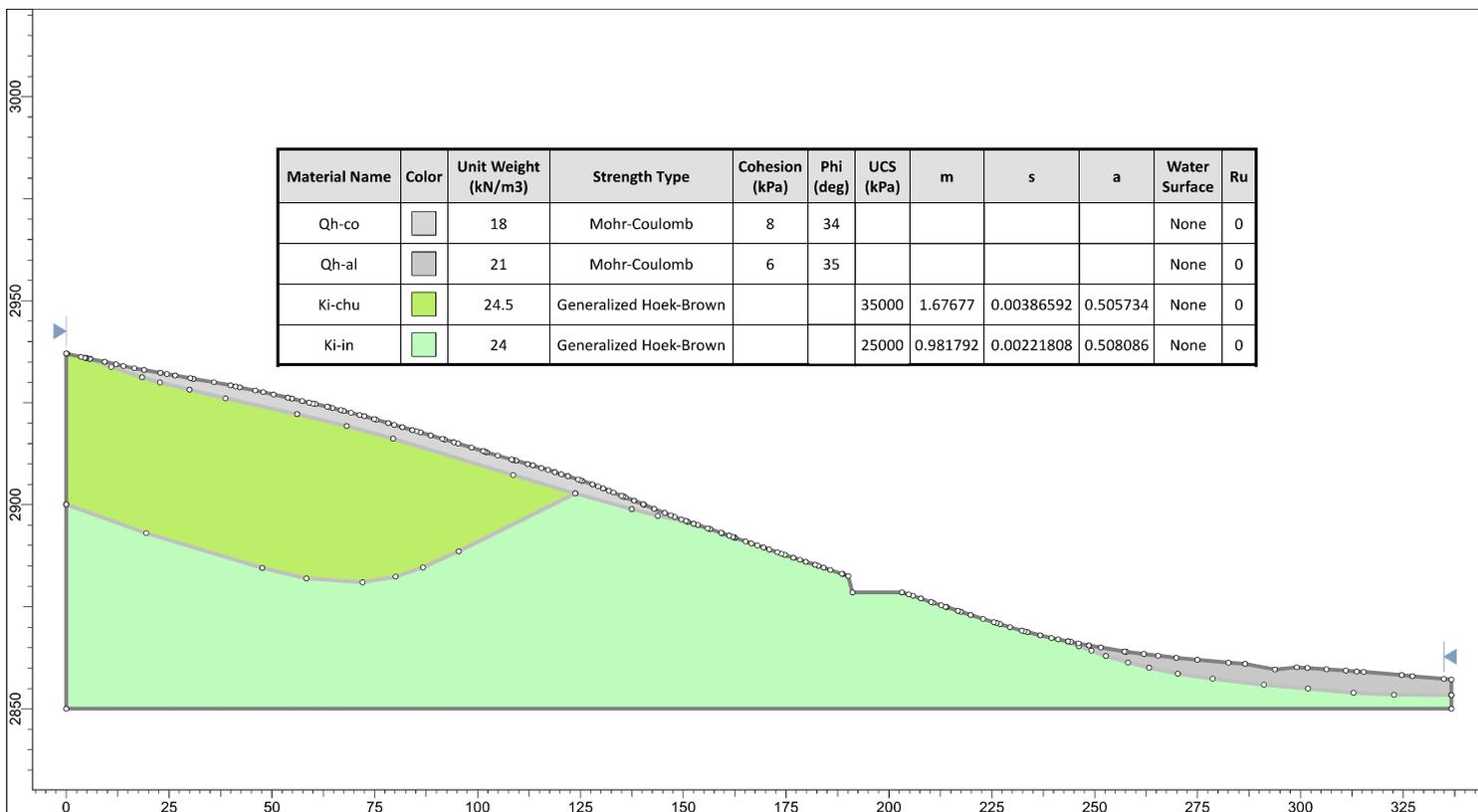
APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

<i>ANALISTAS</i>	SLIDE N° 22	SLIDE PERFIL B-B' ACT SIS MAX	<i>FECHA</i>	SEPTIEMBRE 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	<i>ASESOR</i>	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI	

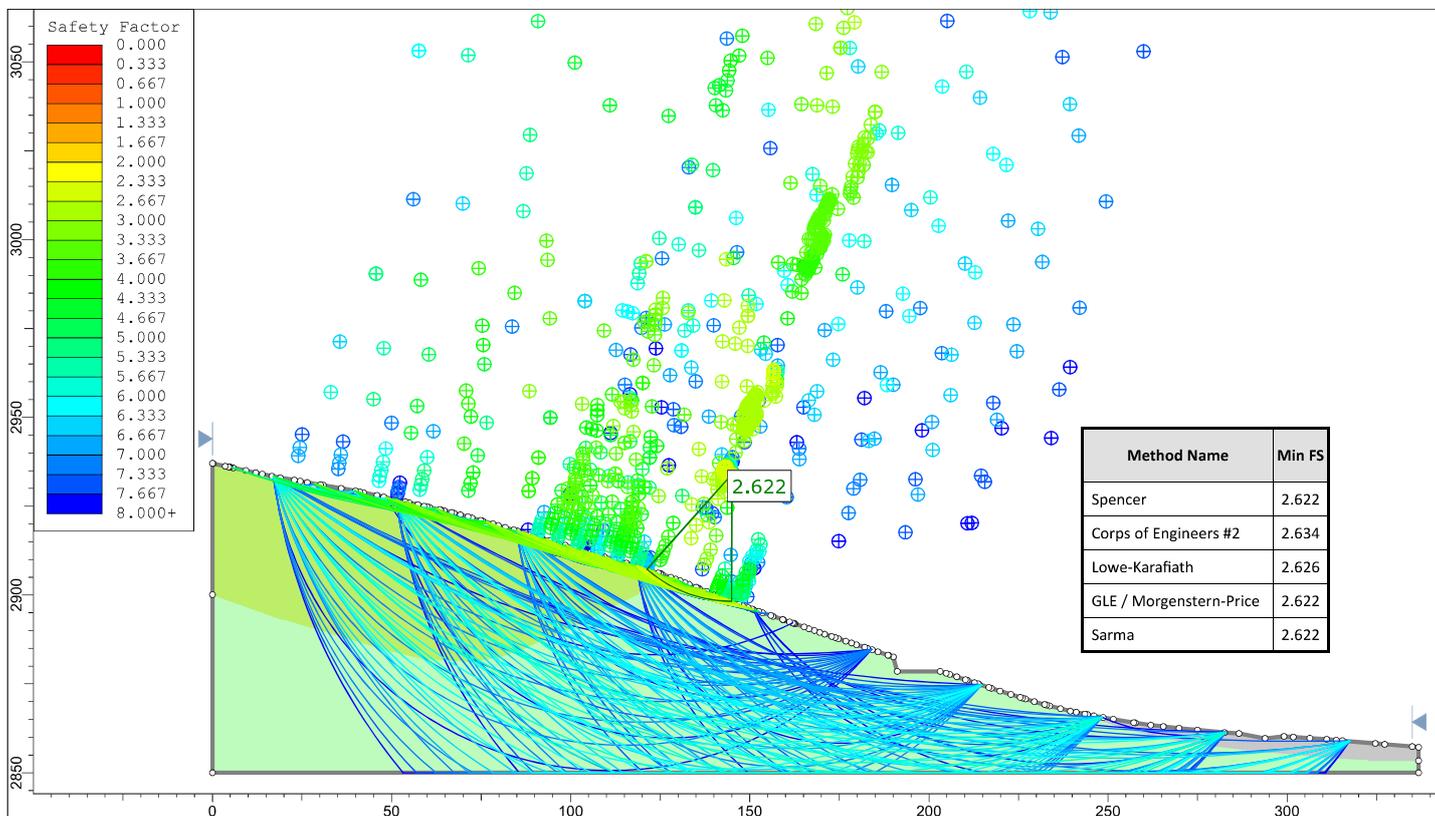




	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
	<b>ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	SLIDE N° 25	SLIDE PERFIL B-B' ACT SIS MAX Y SAT MED	FECHA	SEPTIEMBRE 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
	<b>ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	SLIDE N° 26	SLIDE PERFIL C-C'	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

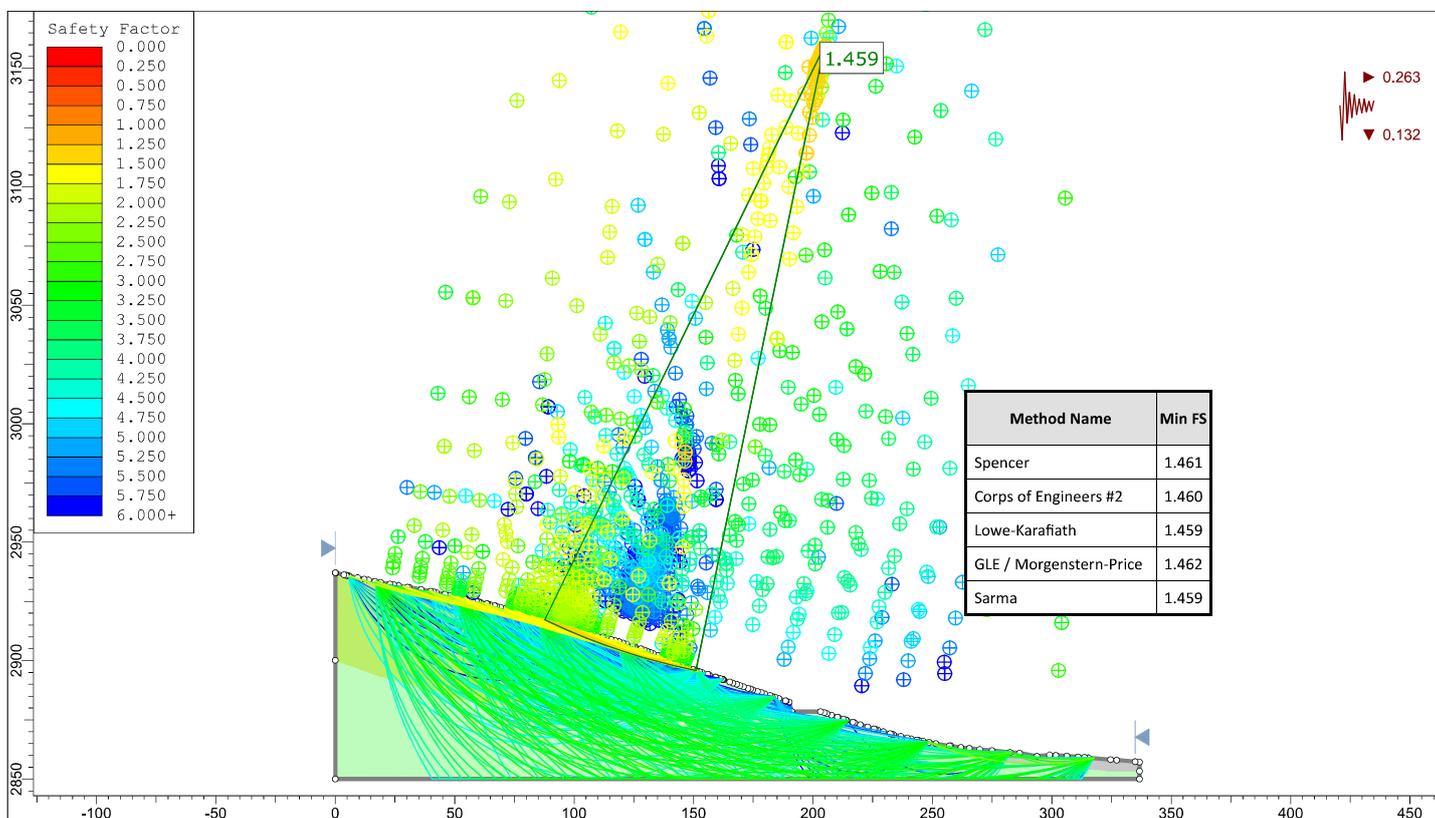
---

*TESIS PROFESIONAL*

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

---

<i>ANALISIS</i>	SLIDE N° 27	SLIDE PERFIL C-C' COND NORMALES		<i>FECHA</i>	SEPTIEMBRE DEL 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	<i>ASESOR</i>			MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

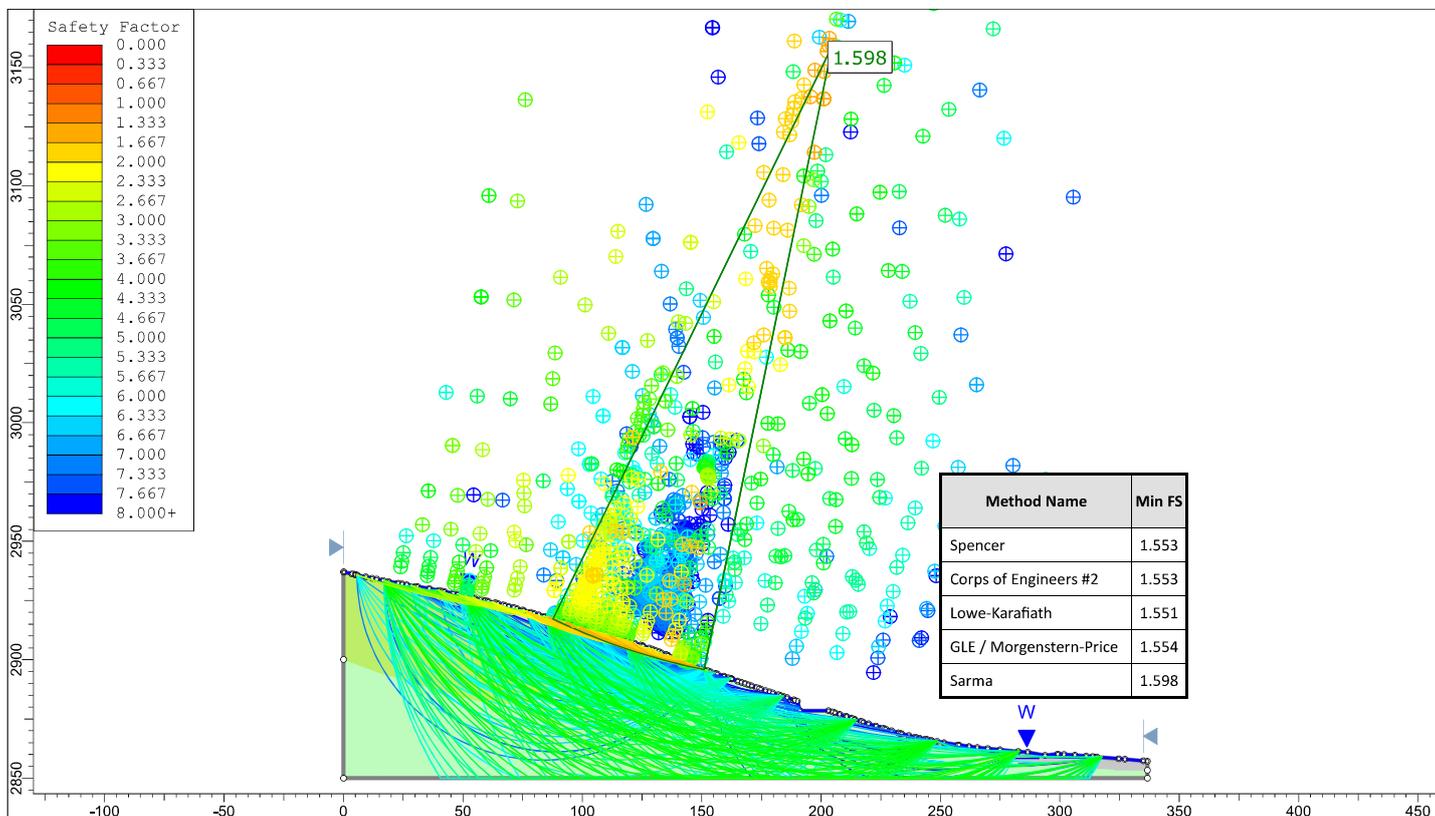
---

*TESIS PROFESIONAL*

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

---

<i>ANALISIS</i>	SLIDE N° 28	SLIDE PERFIL C-C' SIS MAX		<i>FECHA</i>	SEPTIEMBRE DEL 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	<i>ASESOR</i>			MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

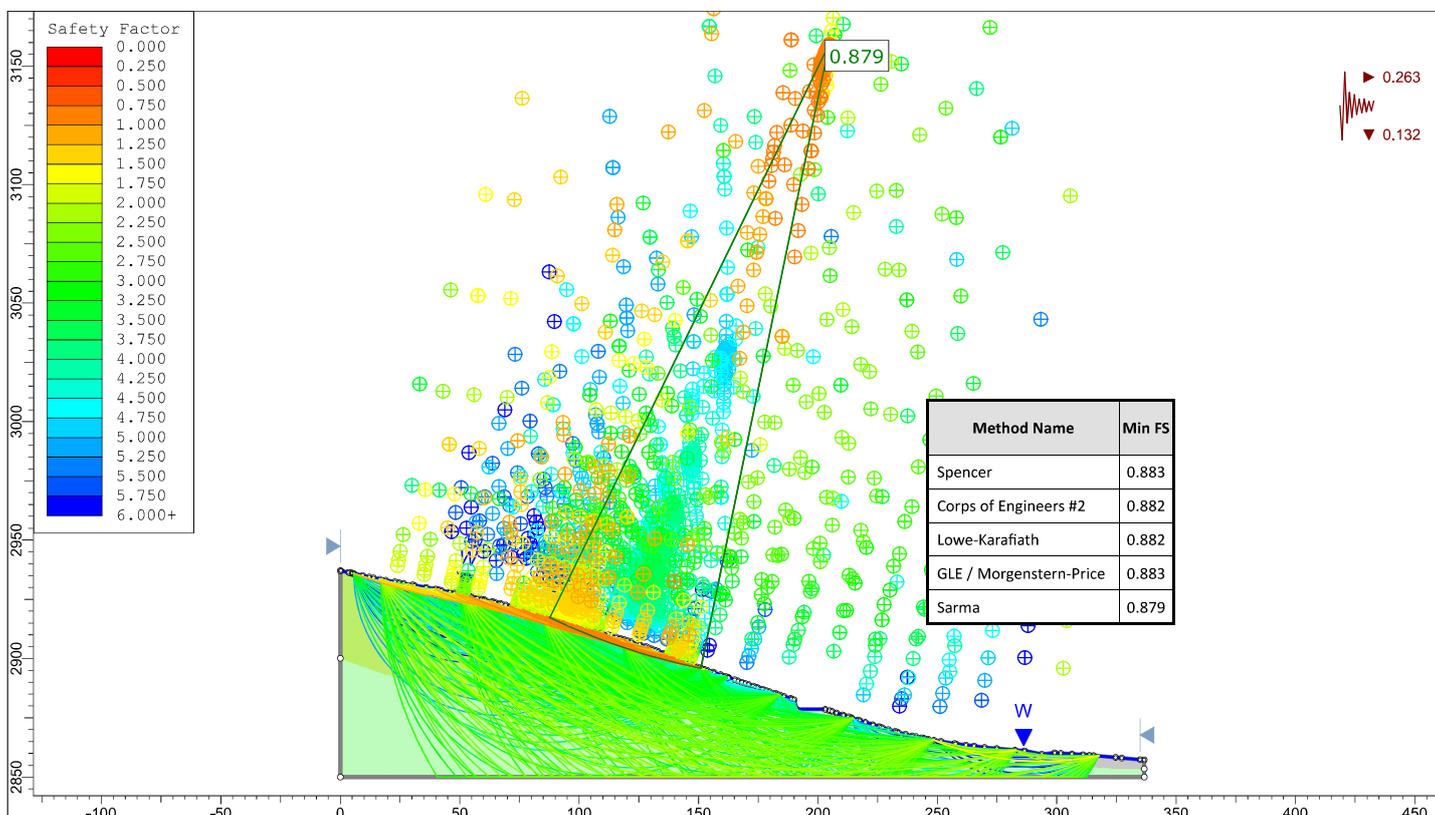


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS SLIDE N° 29 SLIDE PERFIL C-C' SAT TOT FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016

TESISTA BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

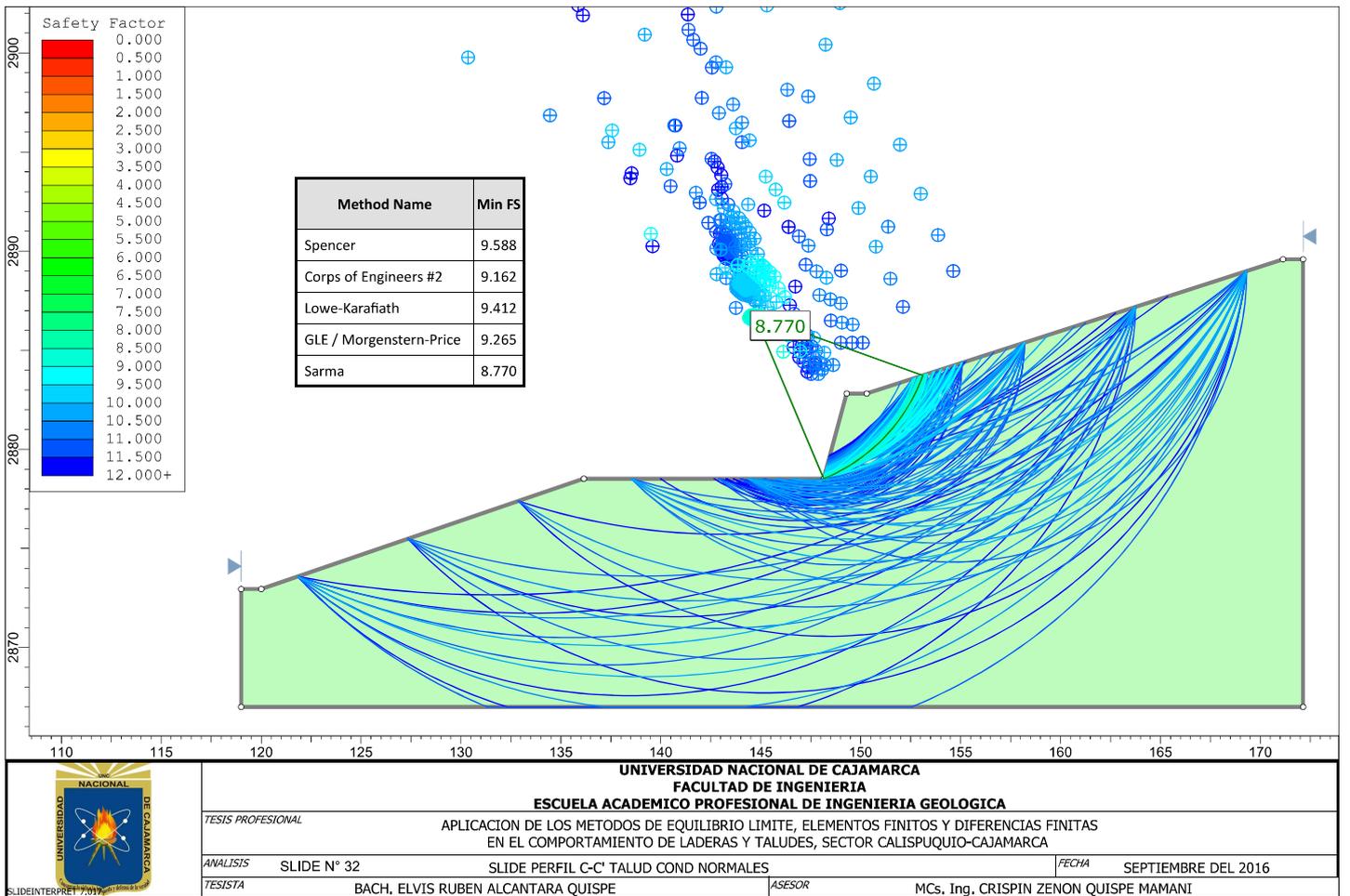
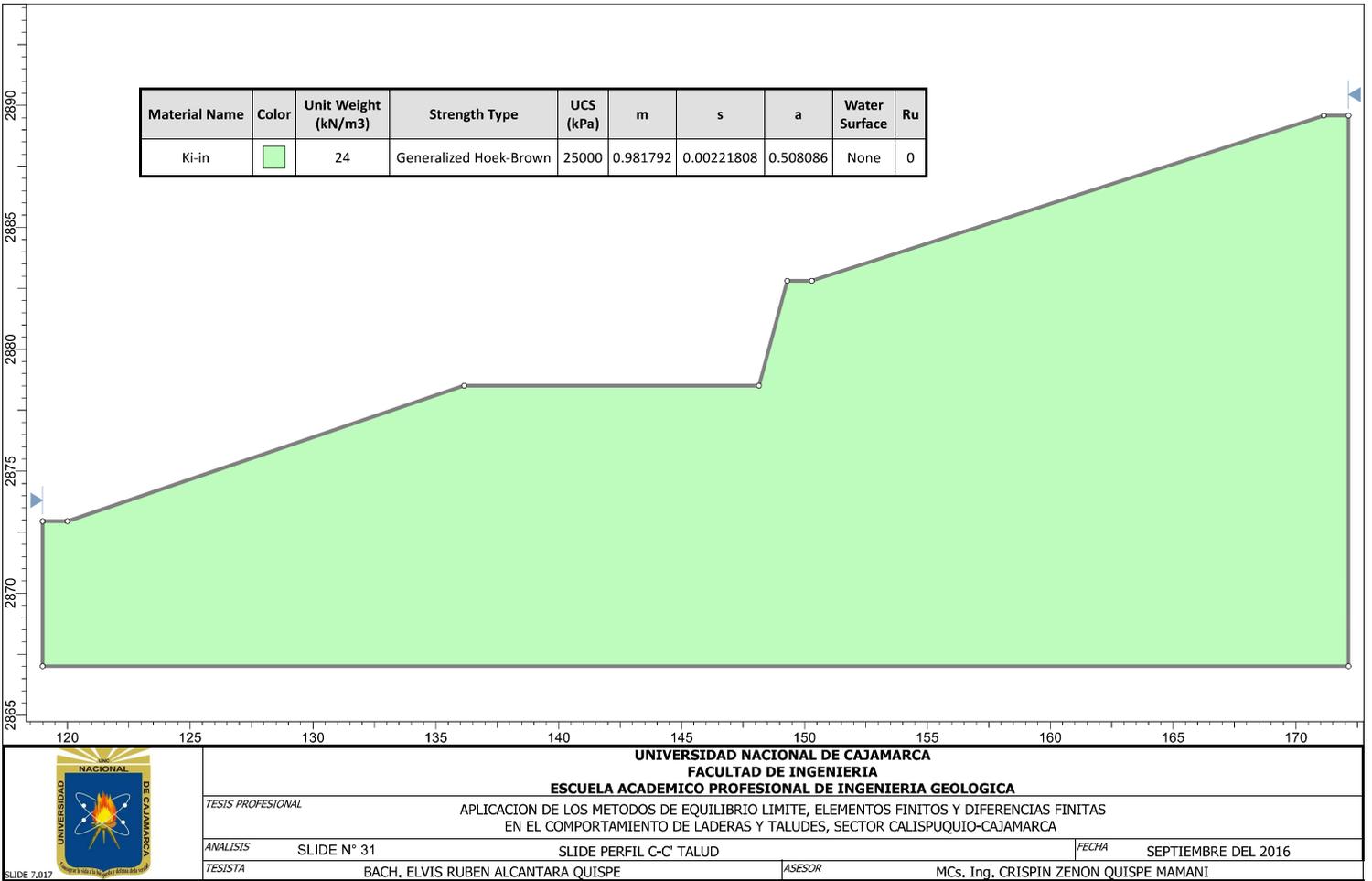


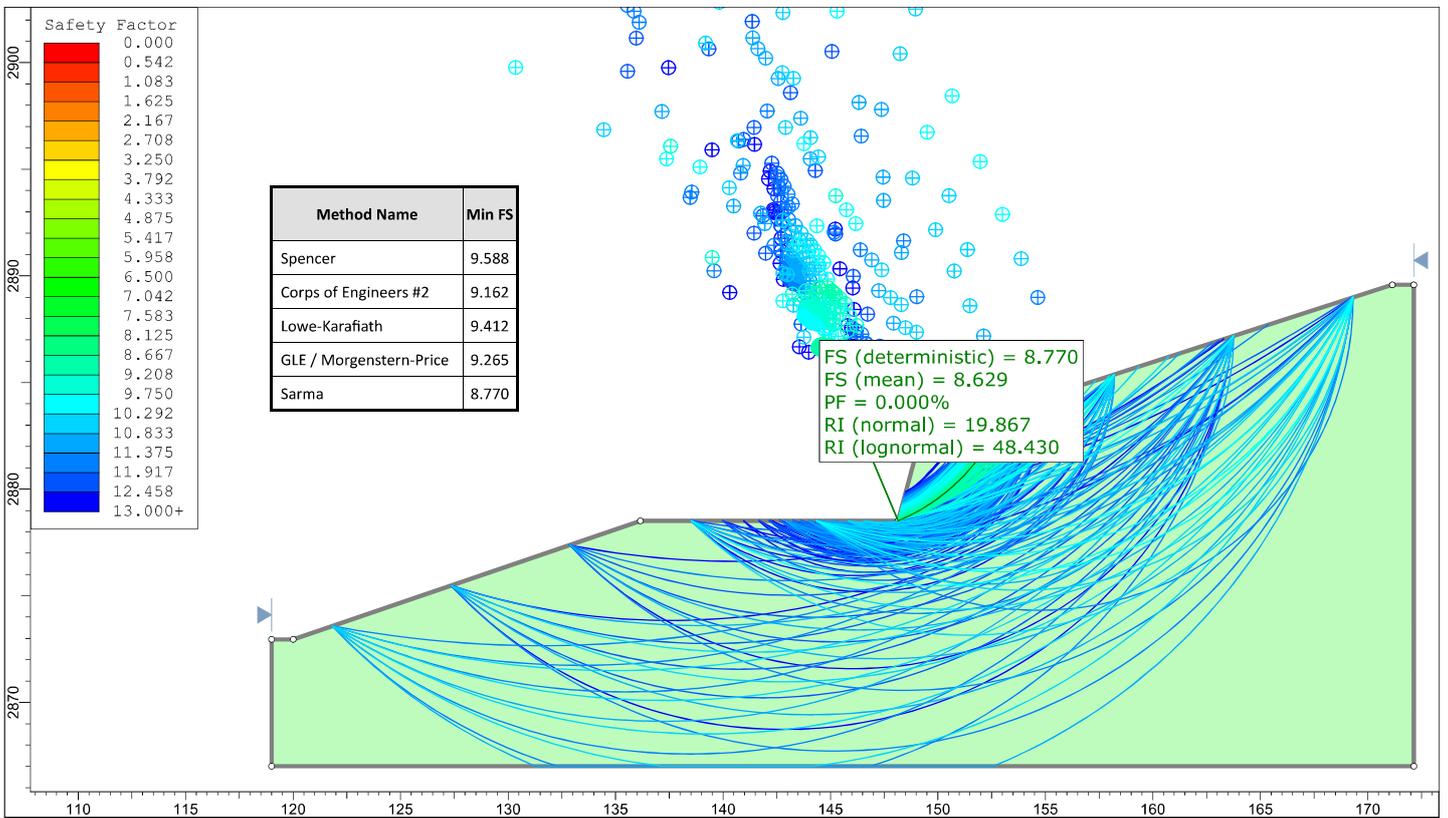
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS SLIDE N° 30 SLIDE PERFIL C-C' SIS MAX Y SAT TOT FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016

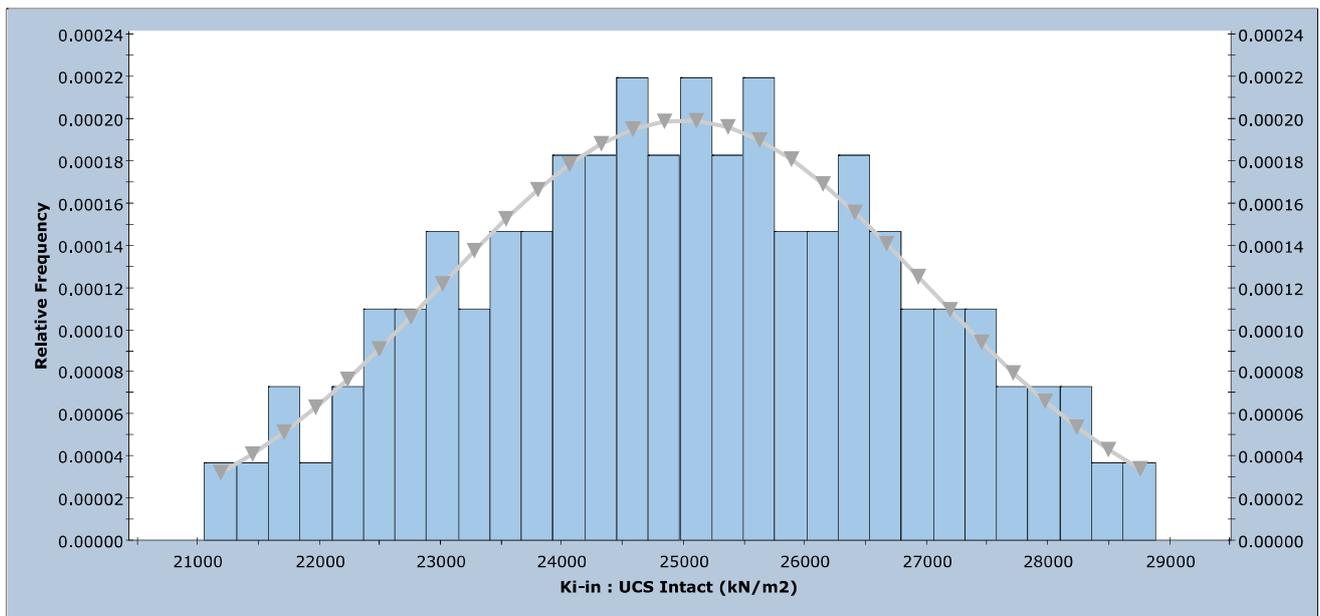
TESISTA BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI





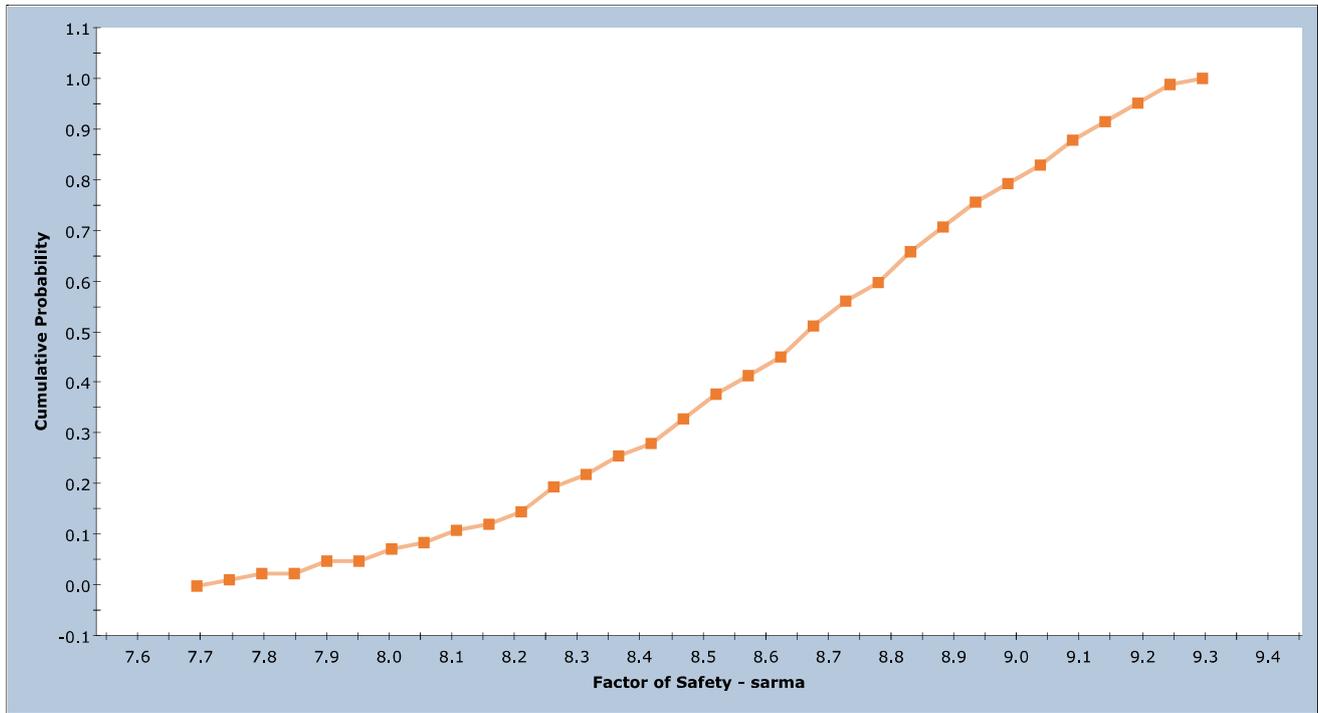
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
	ANALISIS	SLIDE N° 33	SLIDE PERFIL C-C' TALUD COND NORMALES PROB
	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016	
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

**No data with Factor of Safety - sarma < 1**



**SAMPLED: mean=2.5e+004 s.d.=1770 min=2.106e+004 max=2.888e+004**  
**INPUT: Normal mean=2.5e+004 s.d.=2000 min=2.1e+004 max=2.9e+004**

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
	ANALISIS	SLIDE N° 34	SLIDE PERFIL C-C' TALUD COND NORMALES PROB
	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016	
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

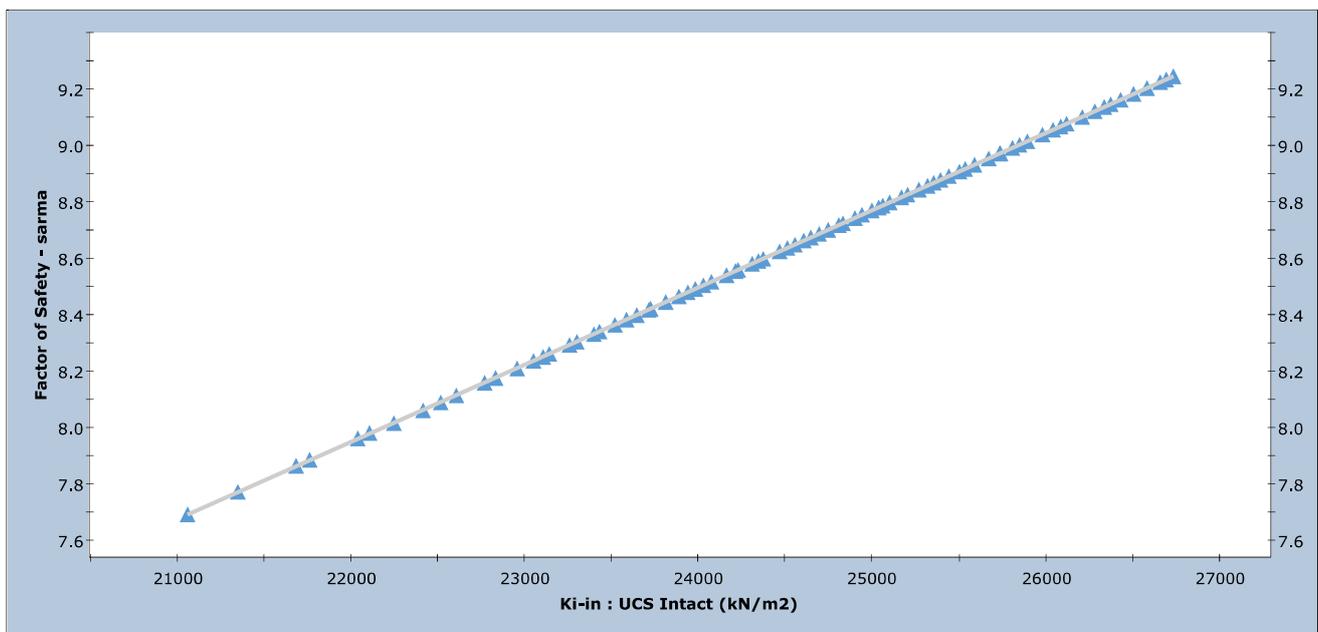


SAMPLED: mean=8.629 s.d.=0.384 min=7.694 max=9.243 (PF=0.000% RI=19.86671, best fit=Beta distribution)



<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	SLIDE N° 35	SLIDE PERFIL C-C' TALUD COND NORMALES PROB	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

**No data with Factor of Safety - sarma < 1**

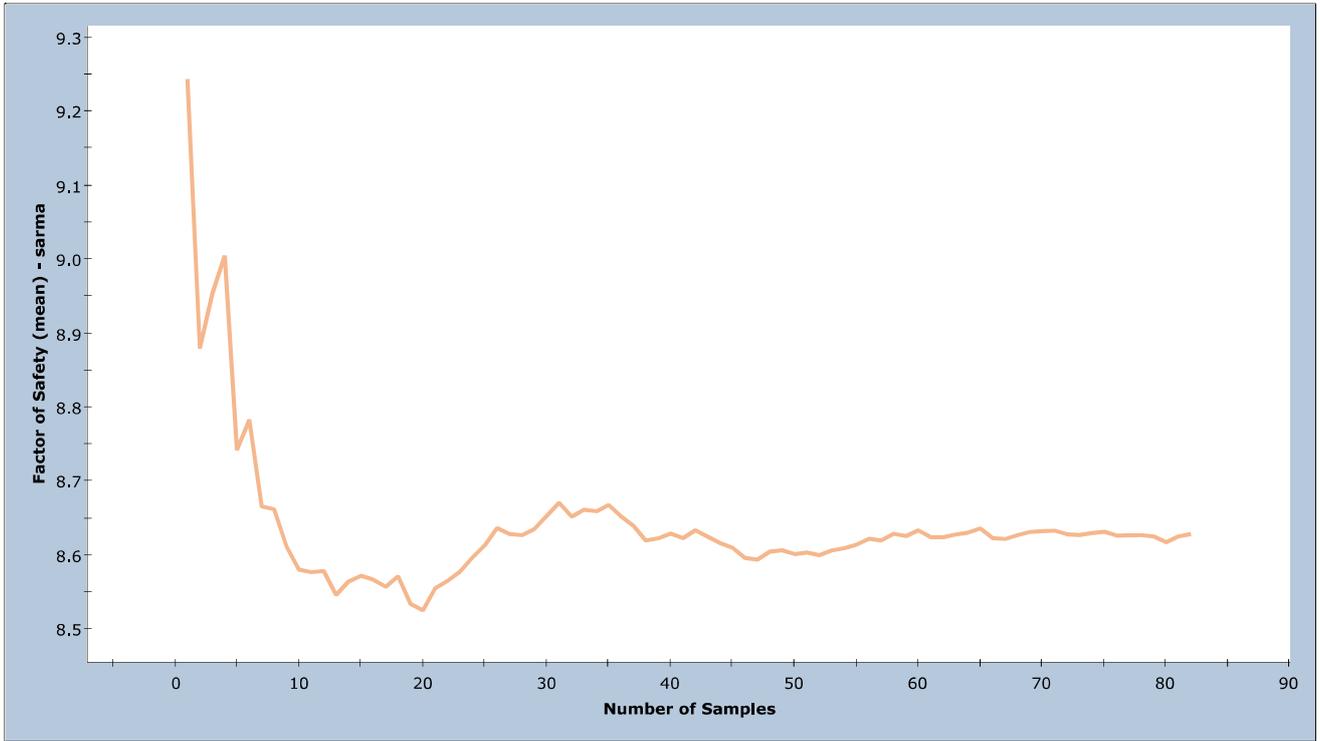


▲ Primary Data    ■ Highlighted Data    — Regression Line

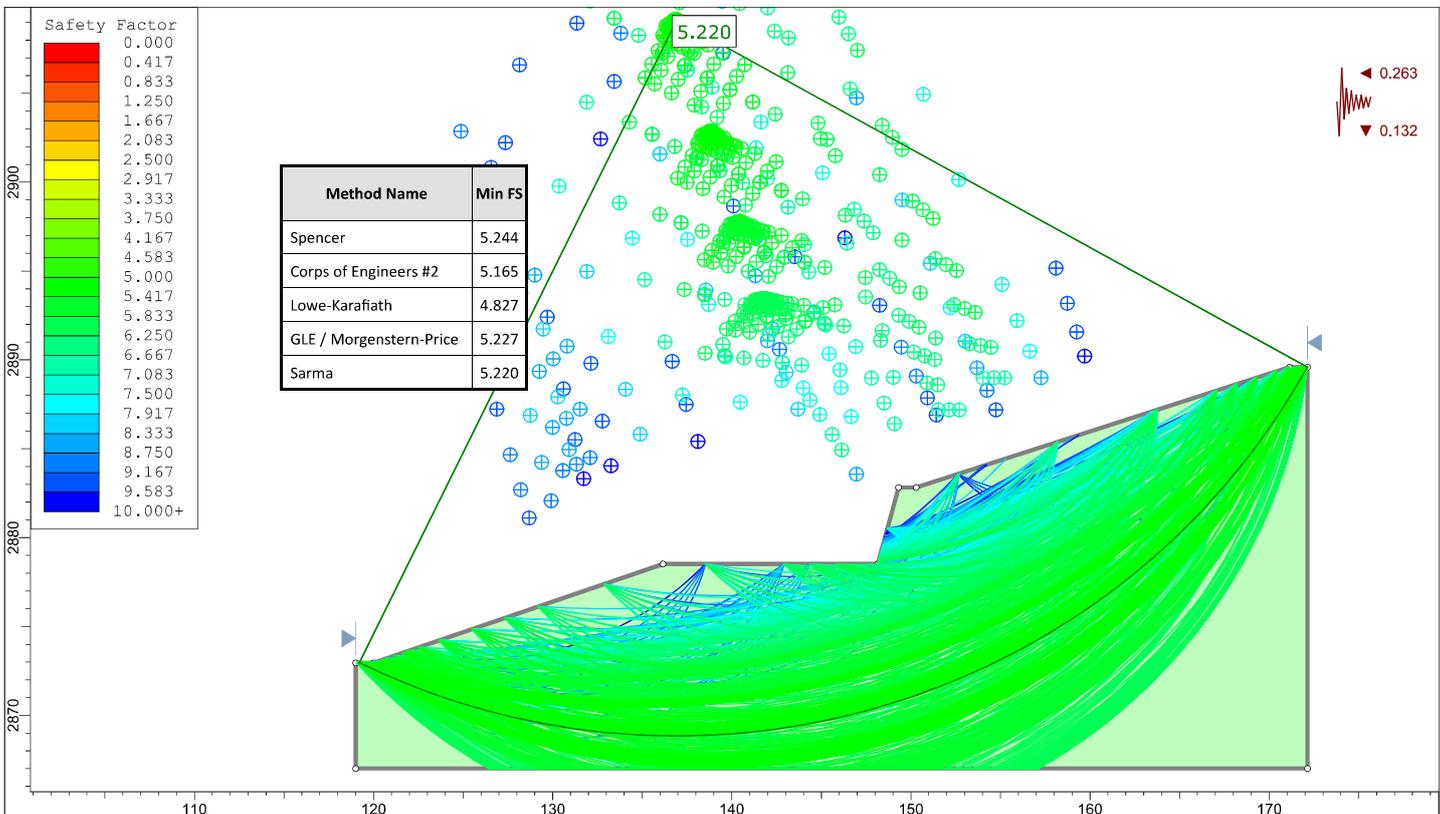
Correlation Coefficient=0.999998, alpha=1.93469, beta=0.000273416



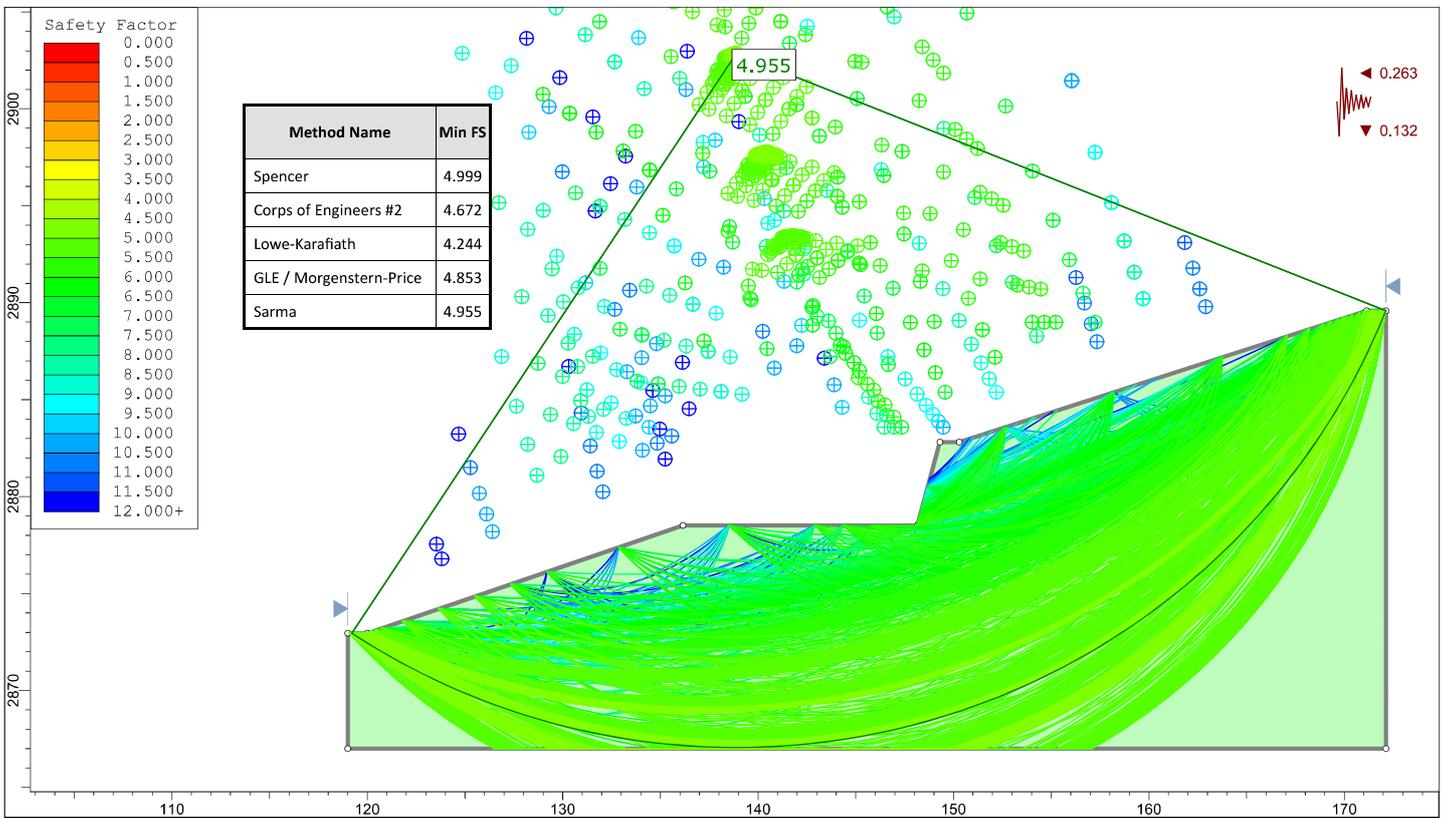
<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	SLIDE N° 36	SLIDE PERFIL C-C' TALUD COND NORMALES PROB	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



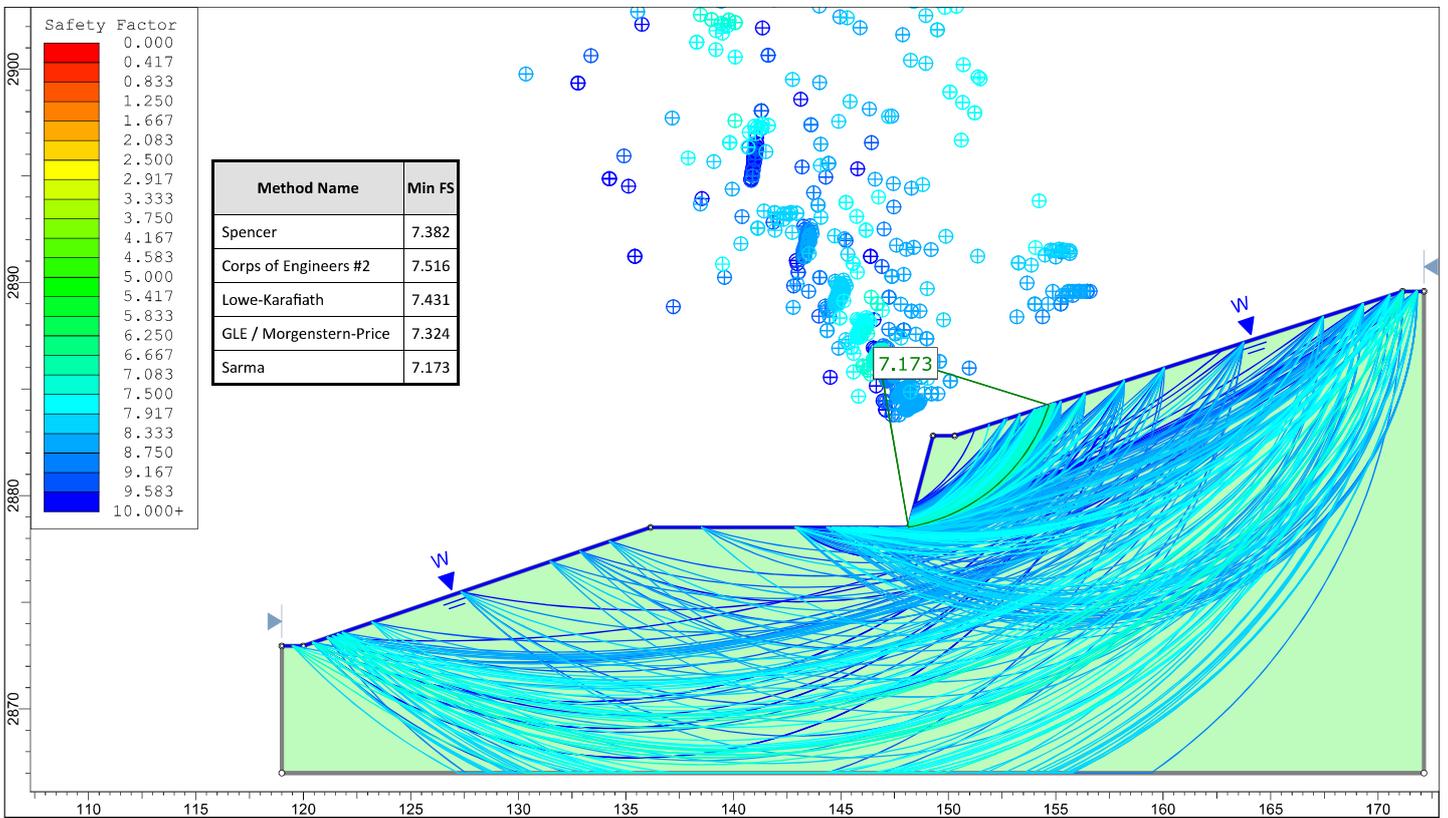
<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	SLIDE N° 37	SLIDE PERFIL C-C' TALUD COND NORMALES PROB	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



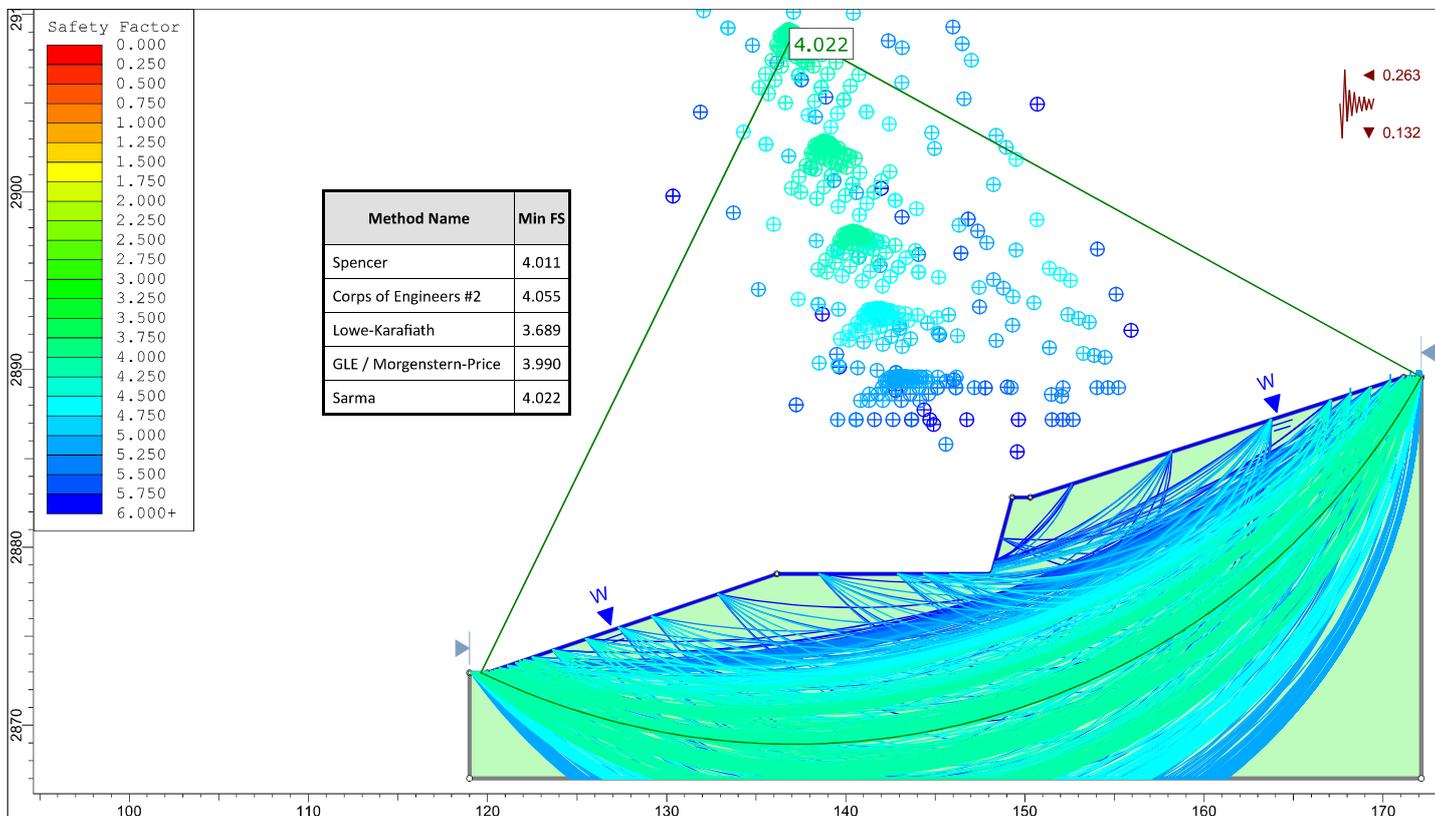
<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	SLIDE N° 38	SLIDE PERFIL C-C' TALUD SIS MAX	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISIS	SLIDE N° 39	SLIDE PERFIL C-C' TALUD SIS MAX EUROCODE 7	FECHA
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



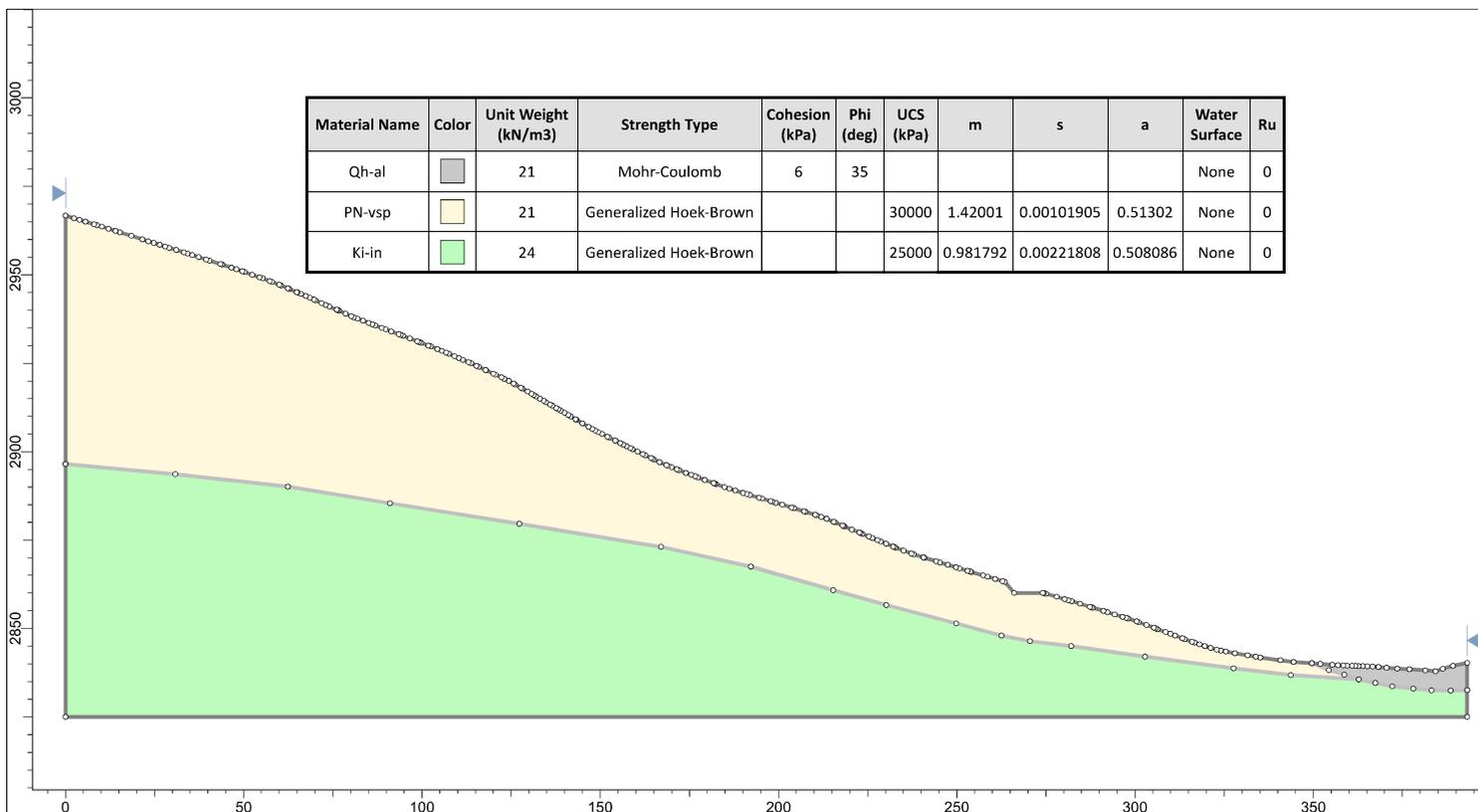
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISIS	SLIDE N° 40	SLIDE PERFIL C-C' TALUD SAT TOT	FECHA
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

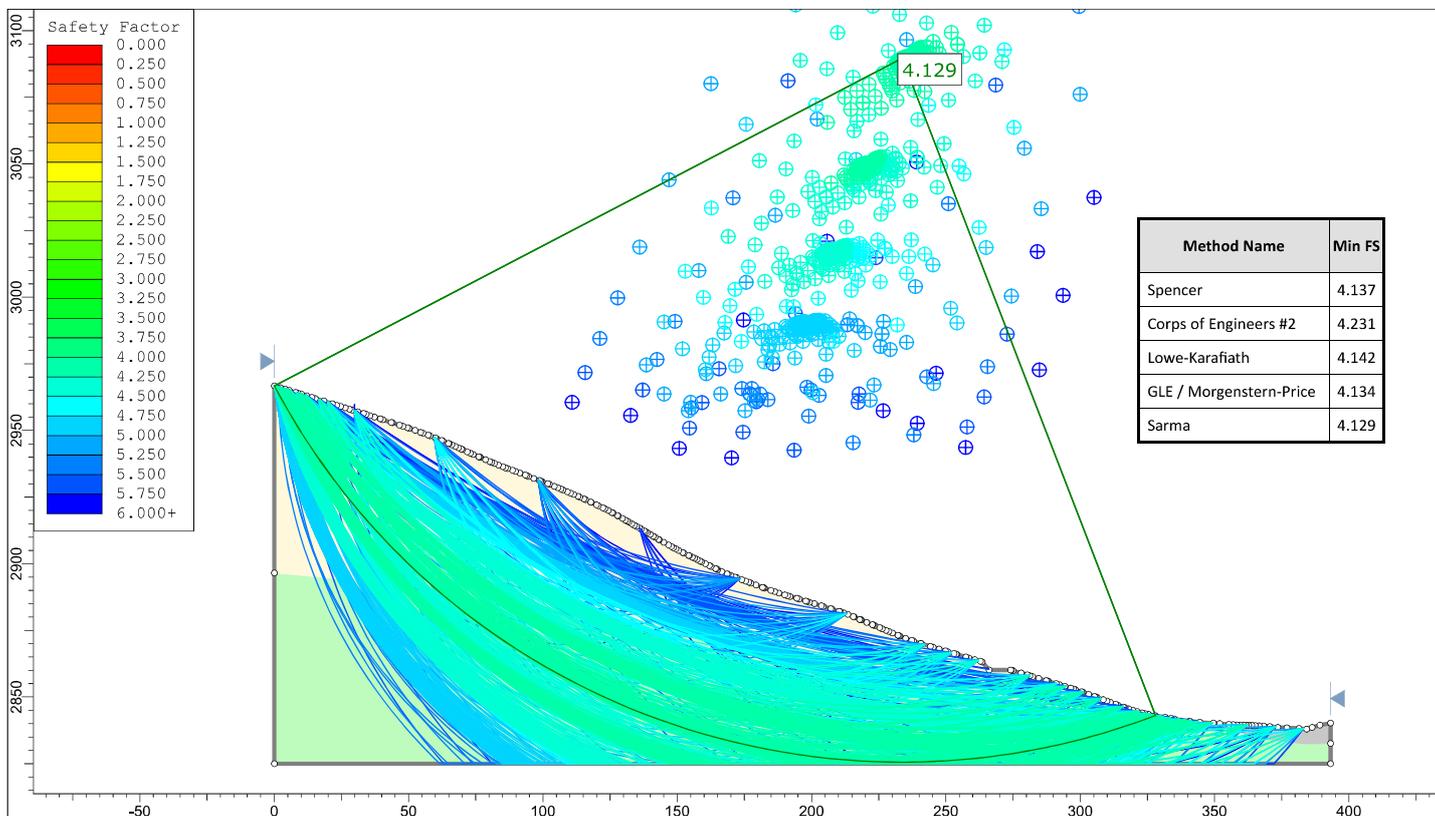
ANALISIS	SLIDE N° 41	SLIDE PERFIL C-C' TALUD SIS MAX Y SAT TOT	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS	SLIDE N° 42	SLIDE PERFIL D-D'	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

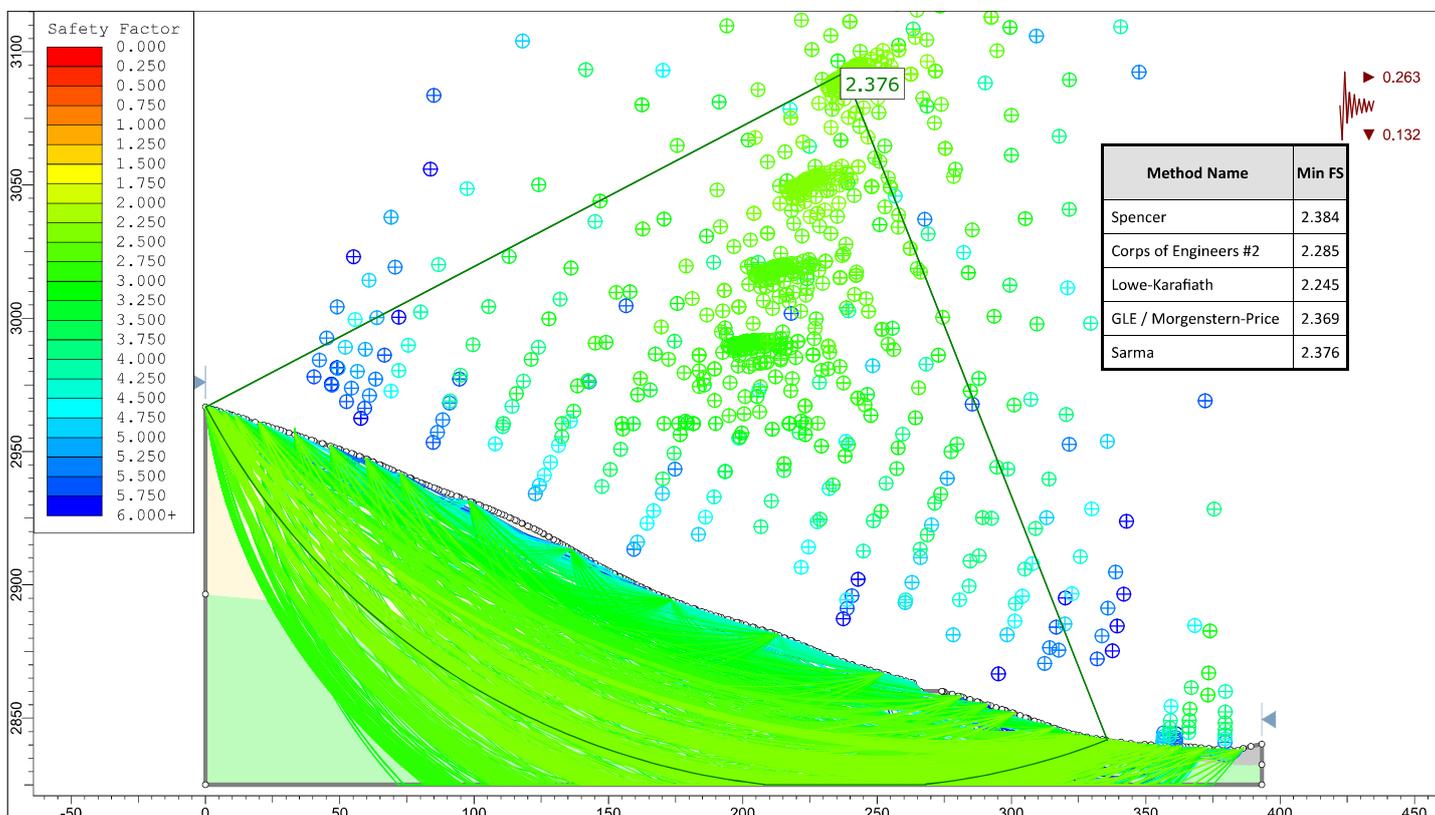


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS SLIDE N° 43 SLIDE PERFIL D-D' COND NORMALES FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016

TESISTA BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE ASESOR M.Cs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

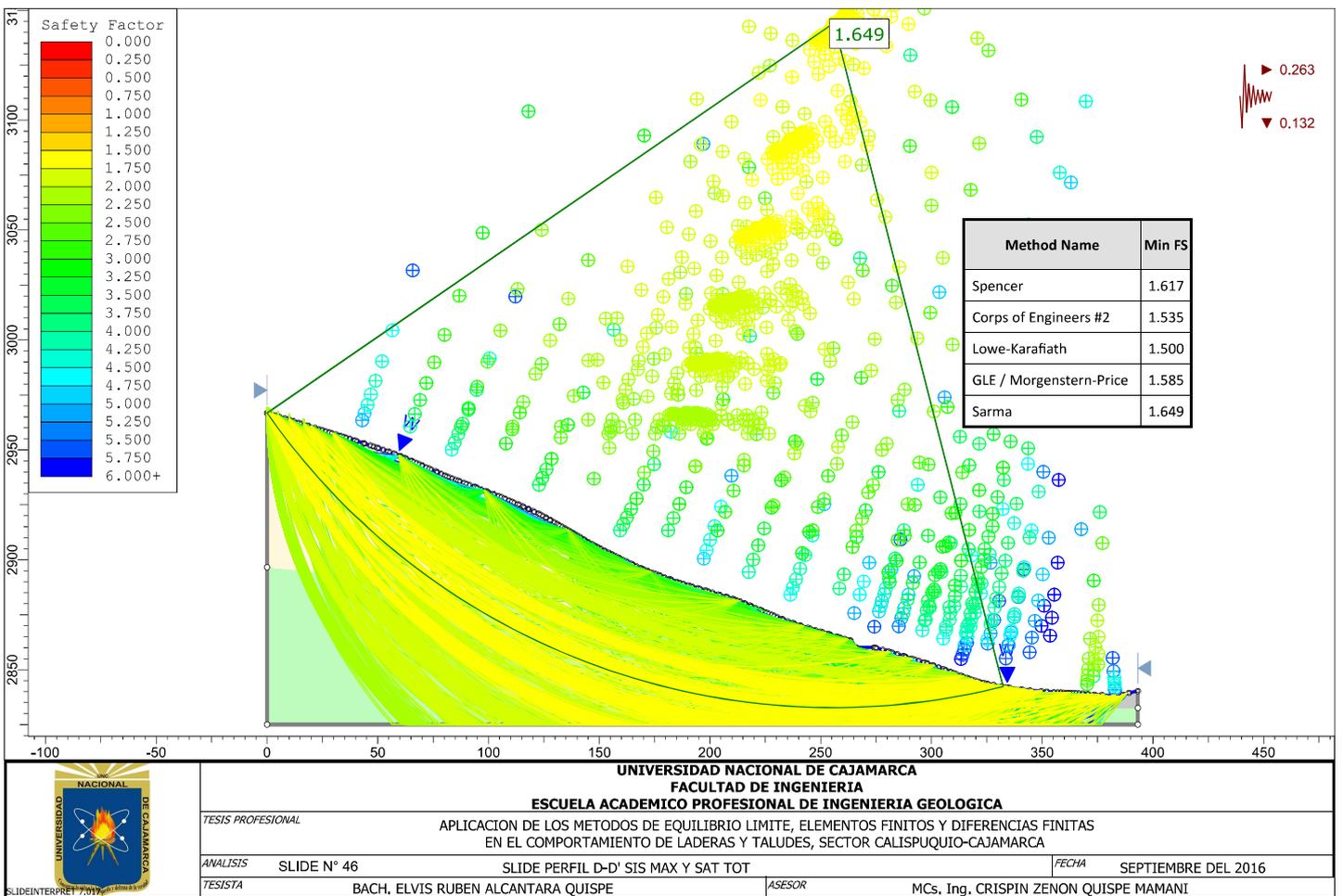
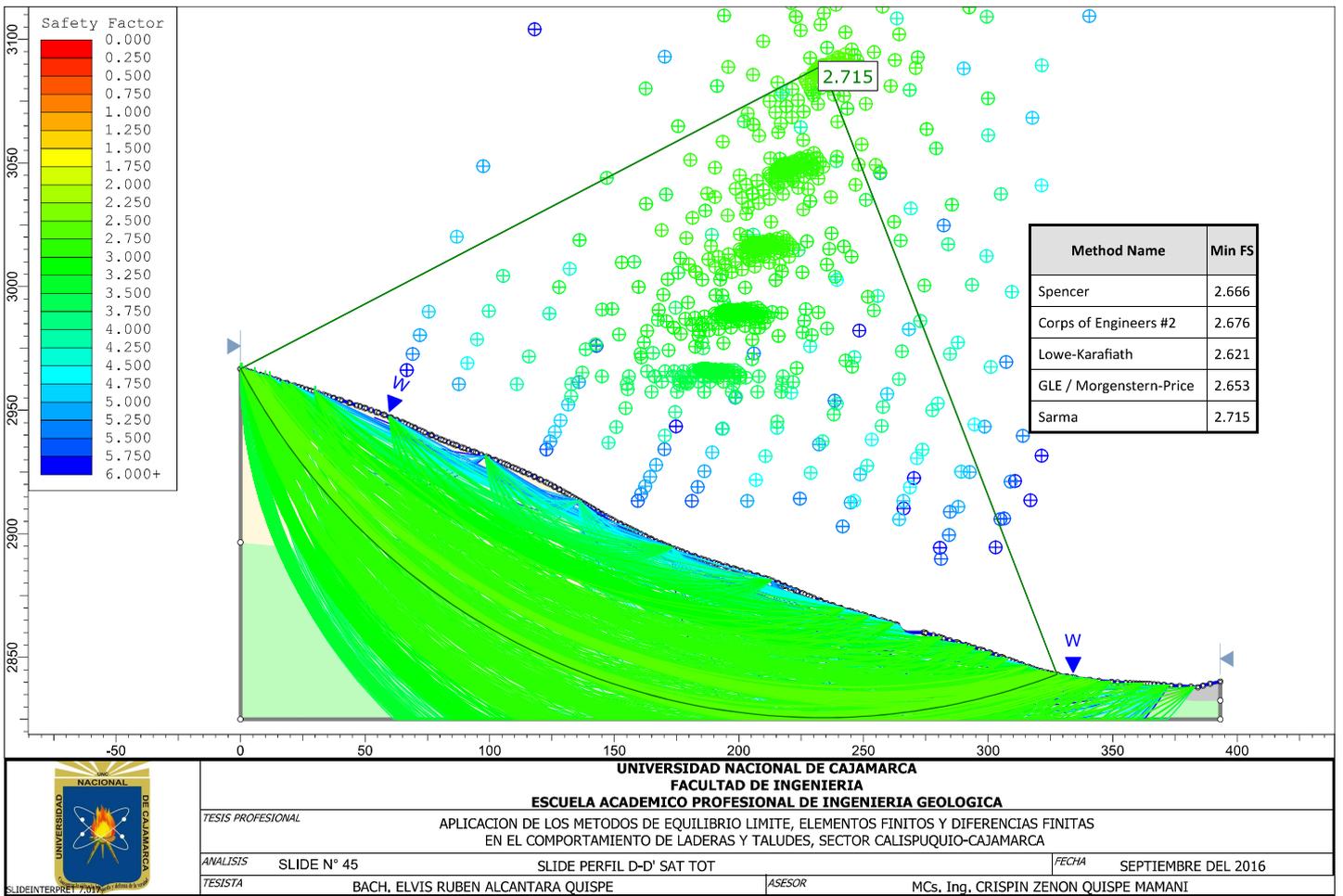


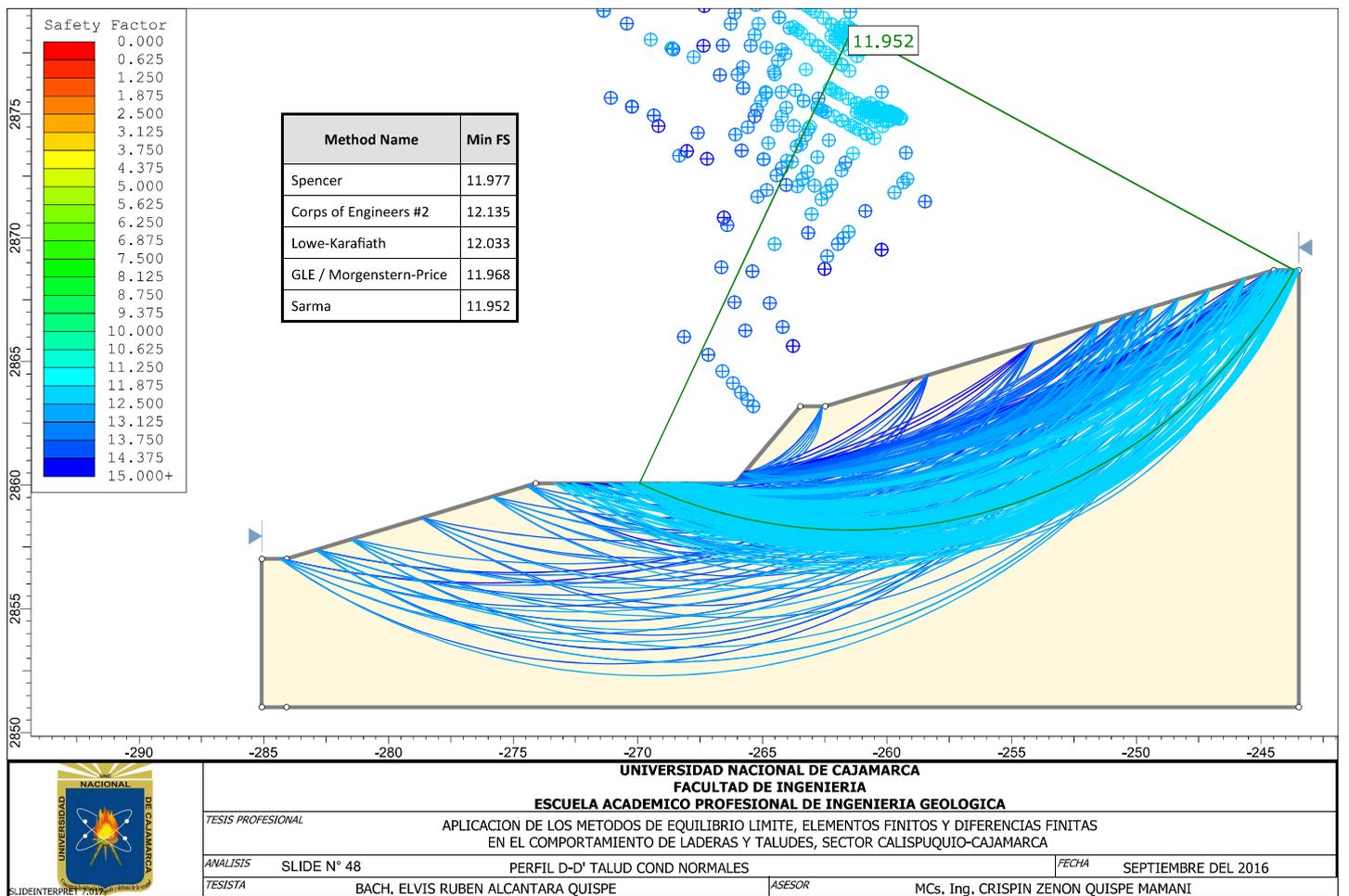
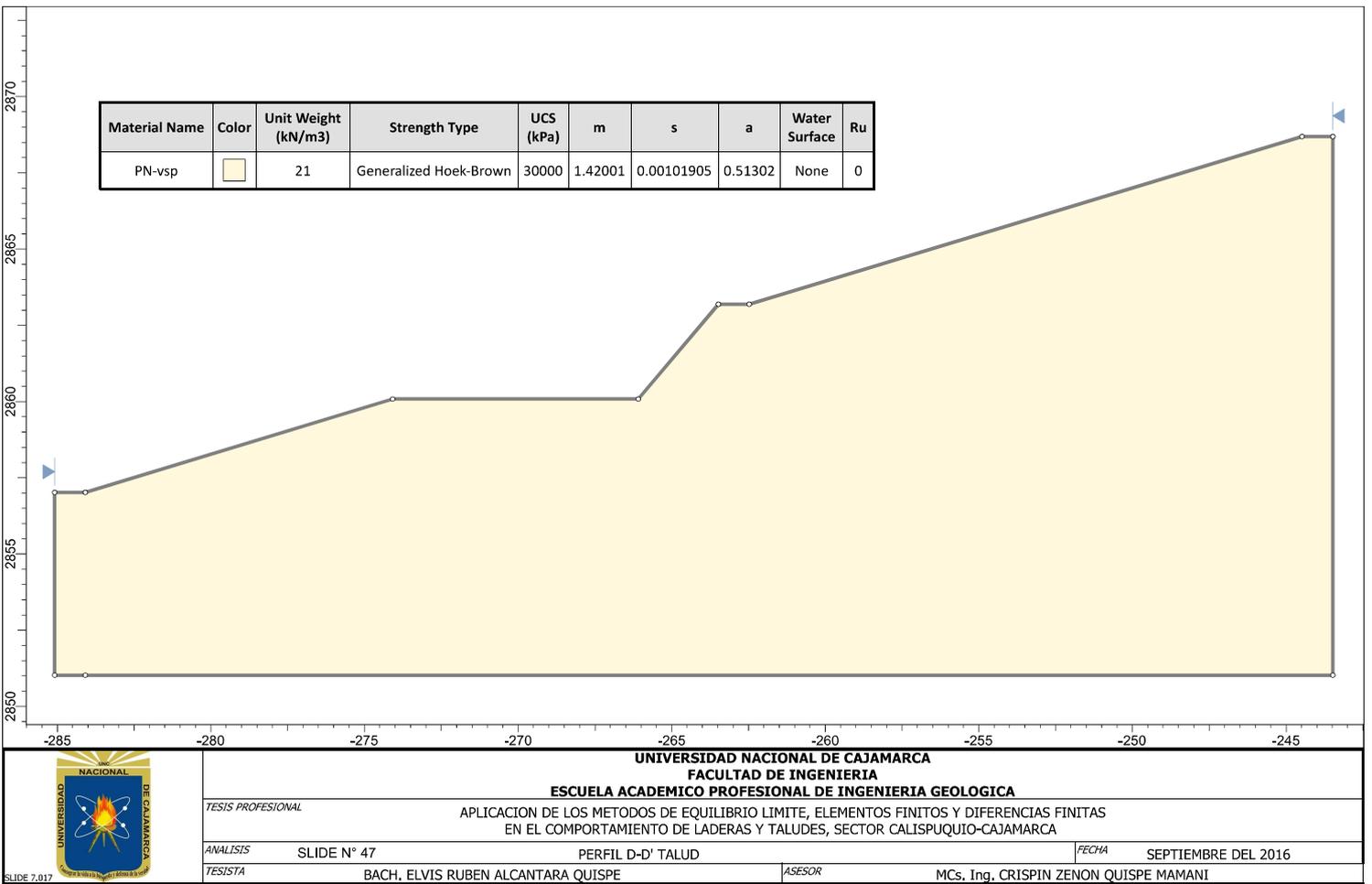
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

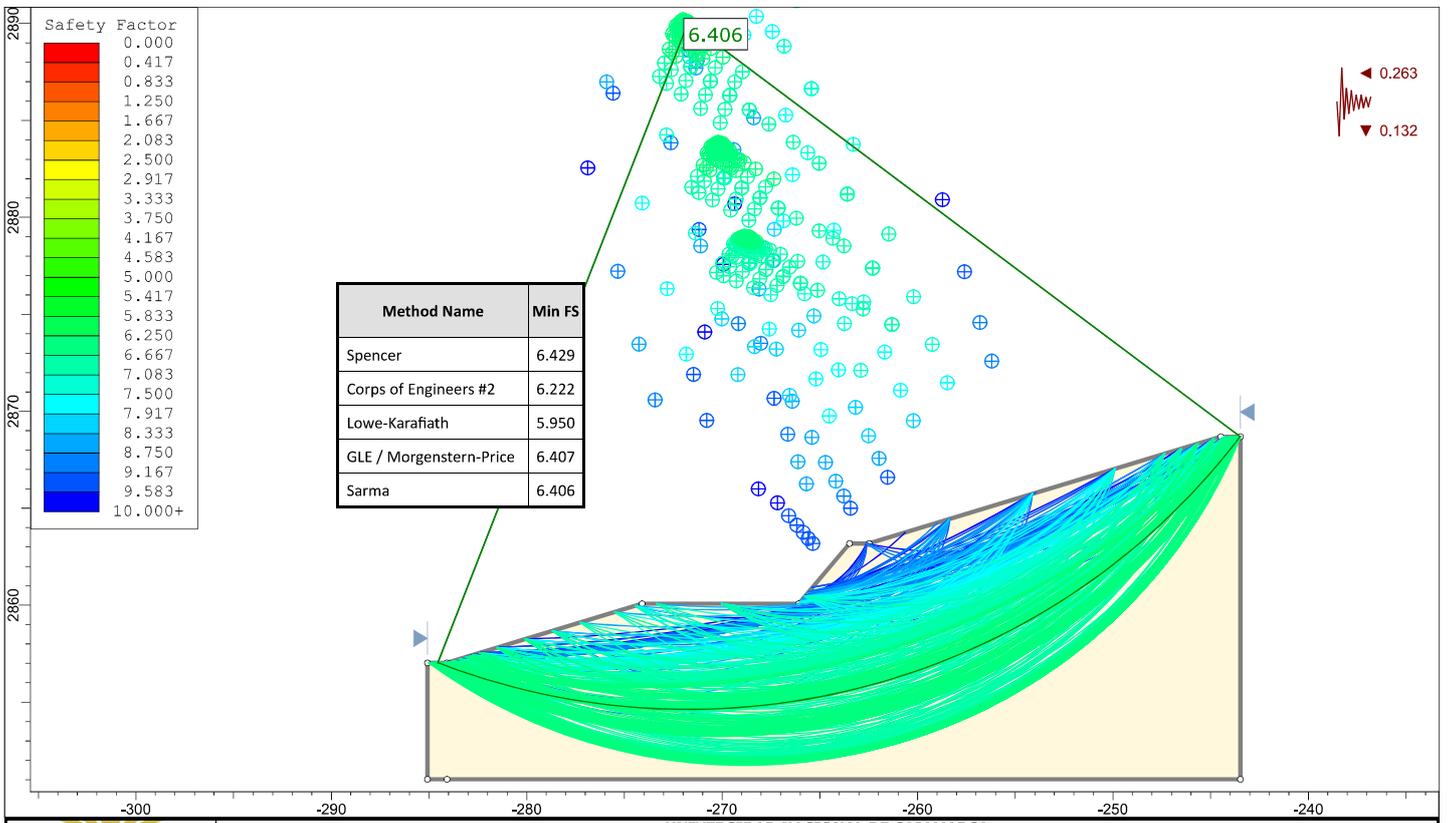
TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS SLIDE N° 44 SLIDE PERFIL D-D' SIS MAX FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016

TESISTA BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE ASESOR M.Cs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



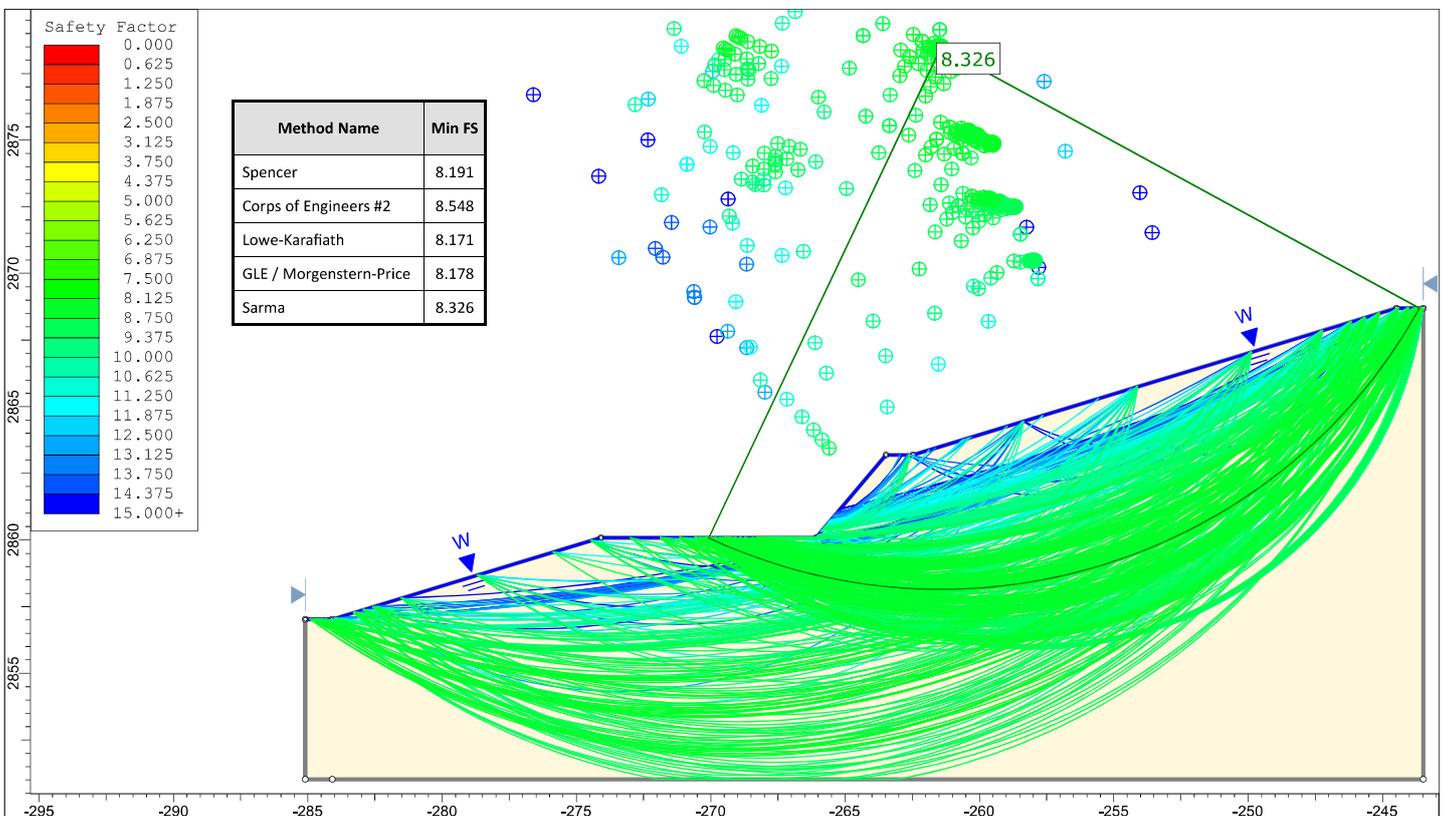




**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

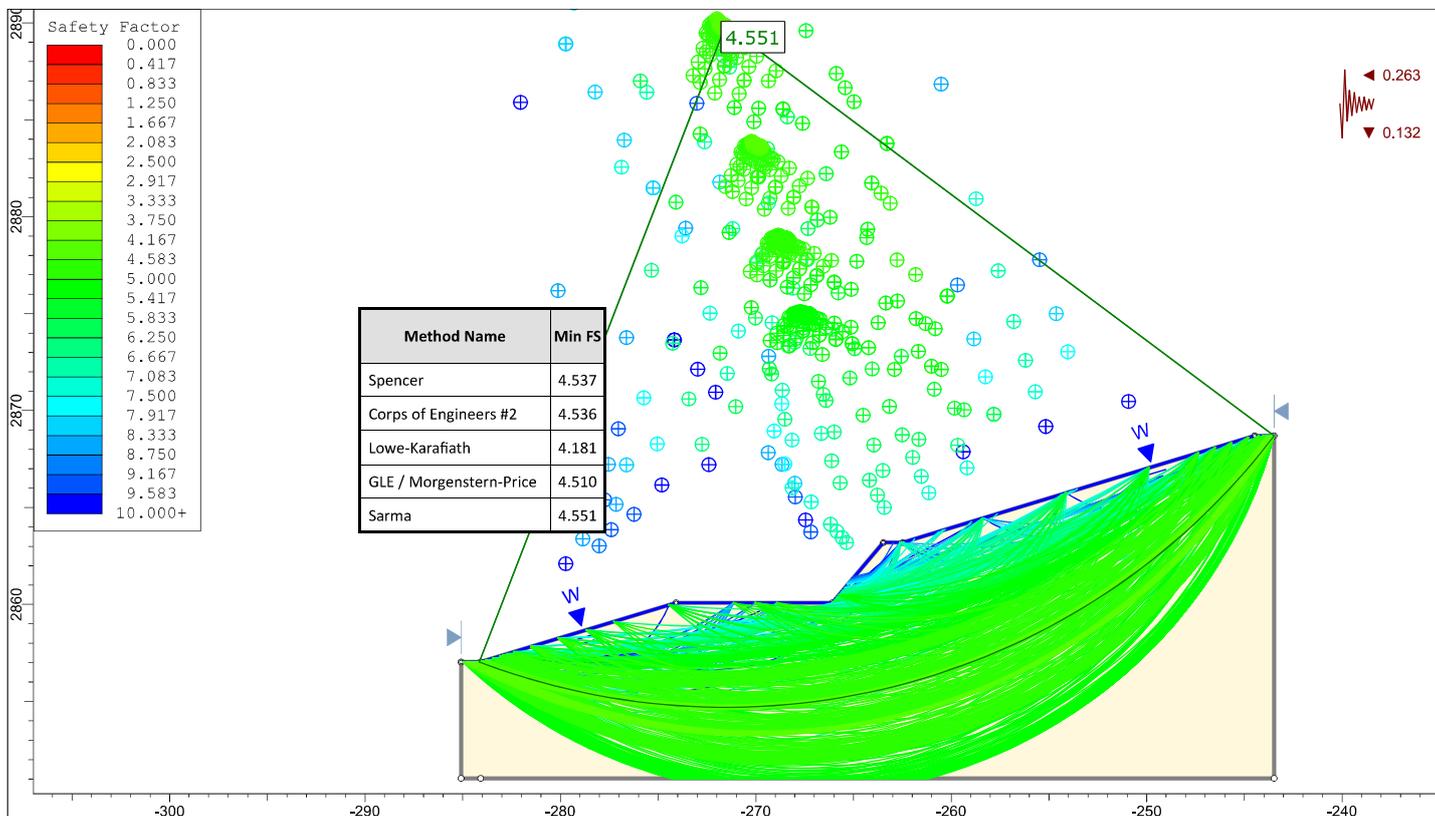
ANALISTA	SLIDE N° 49	PERFIL D-D' TALUD SIS MAX	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



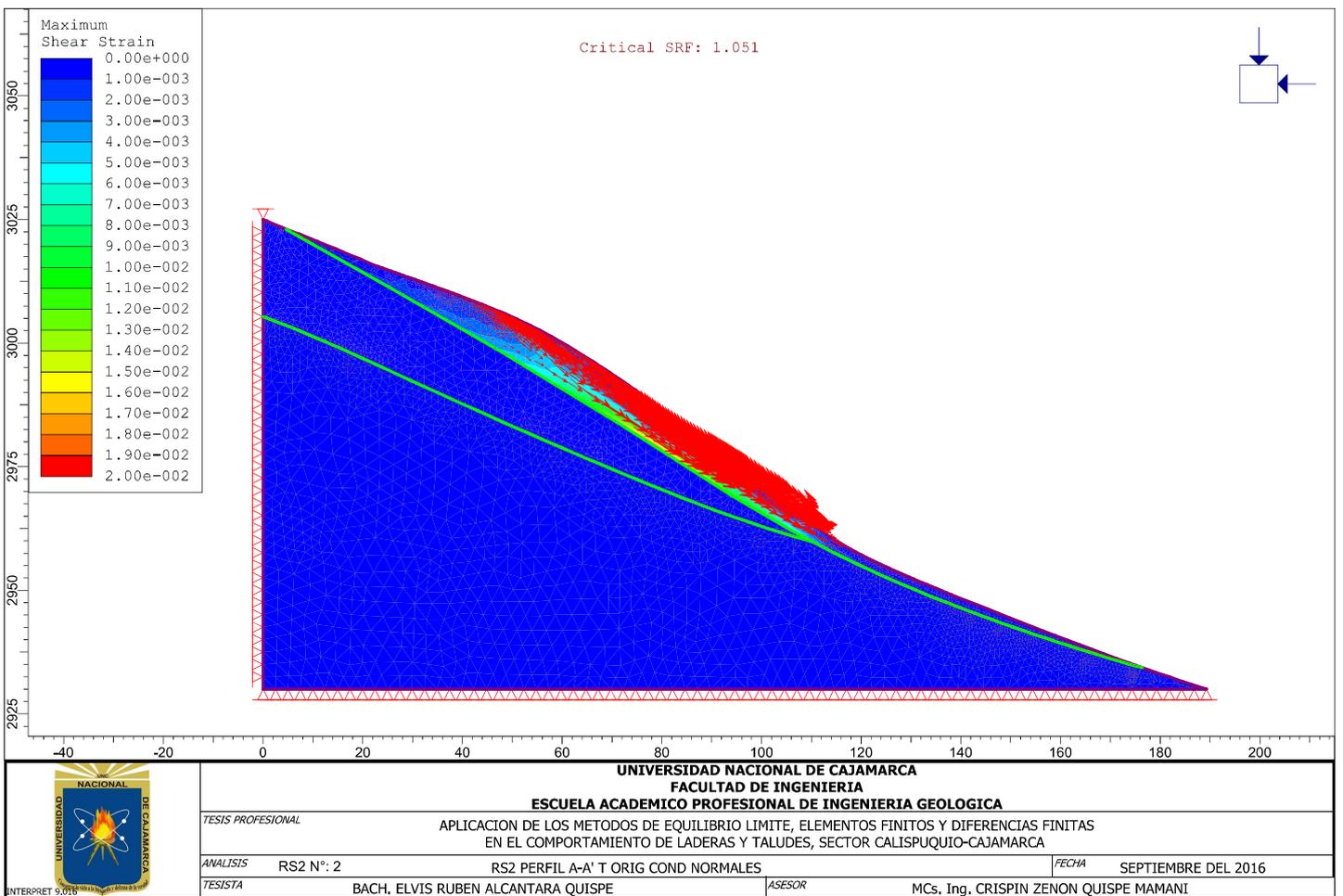
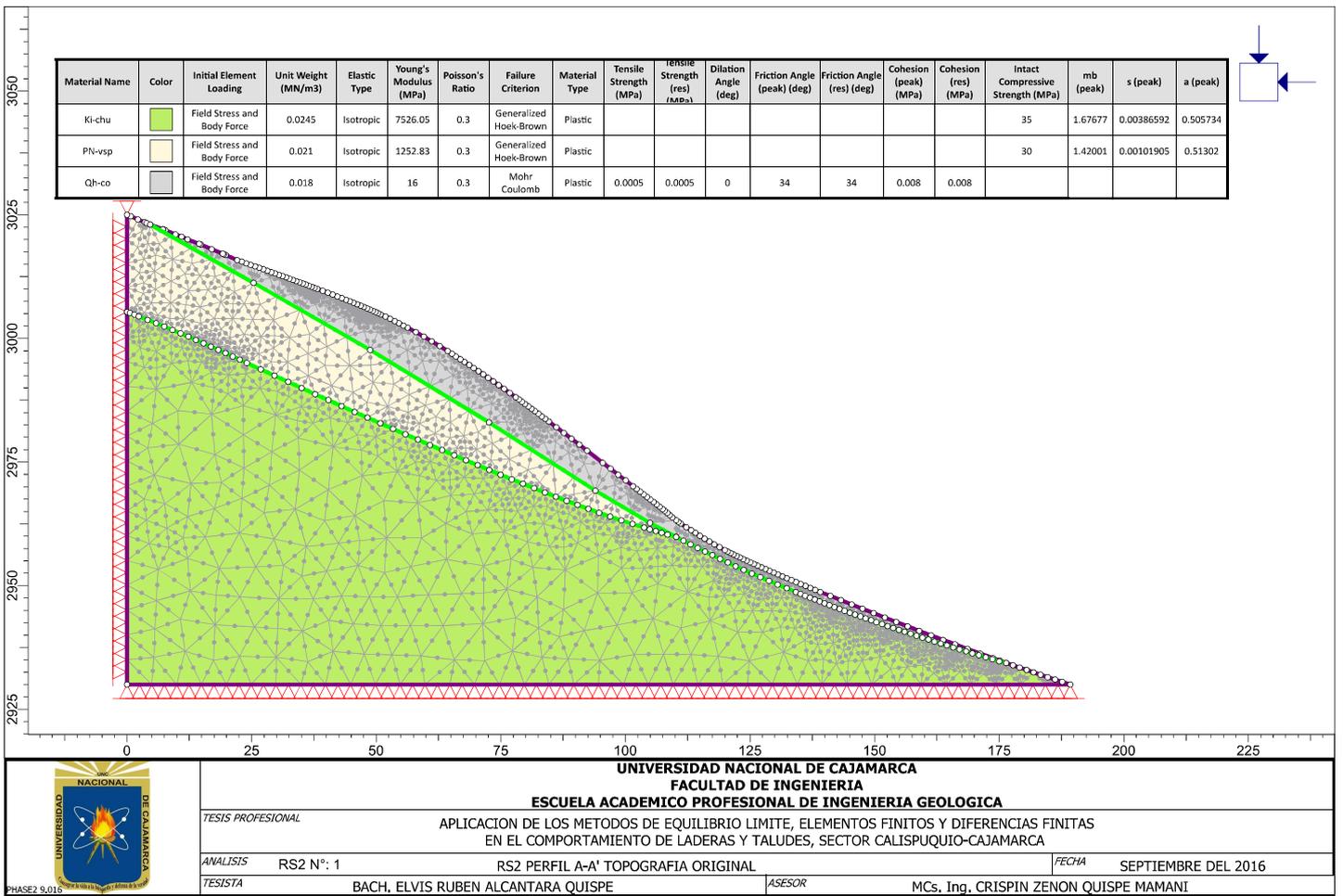
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

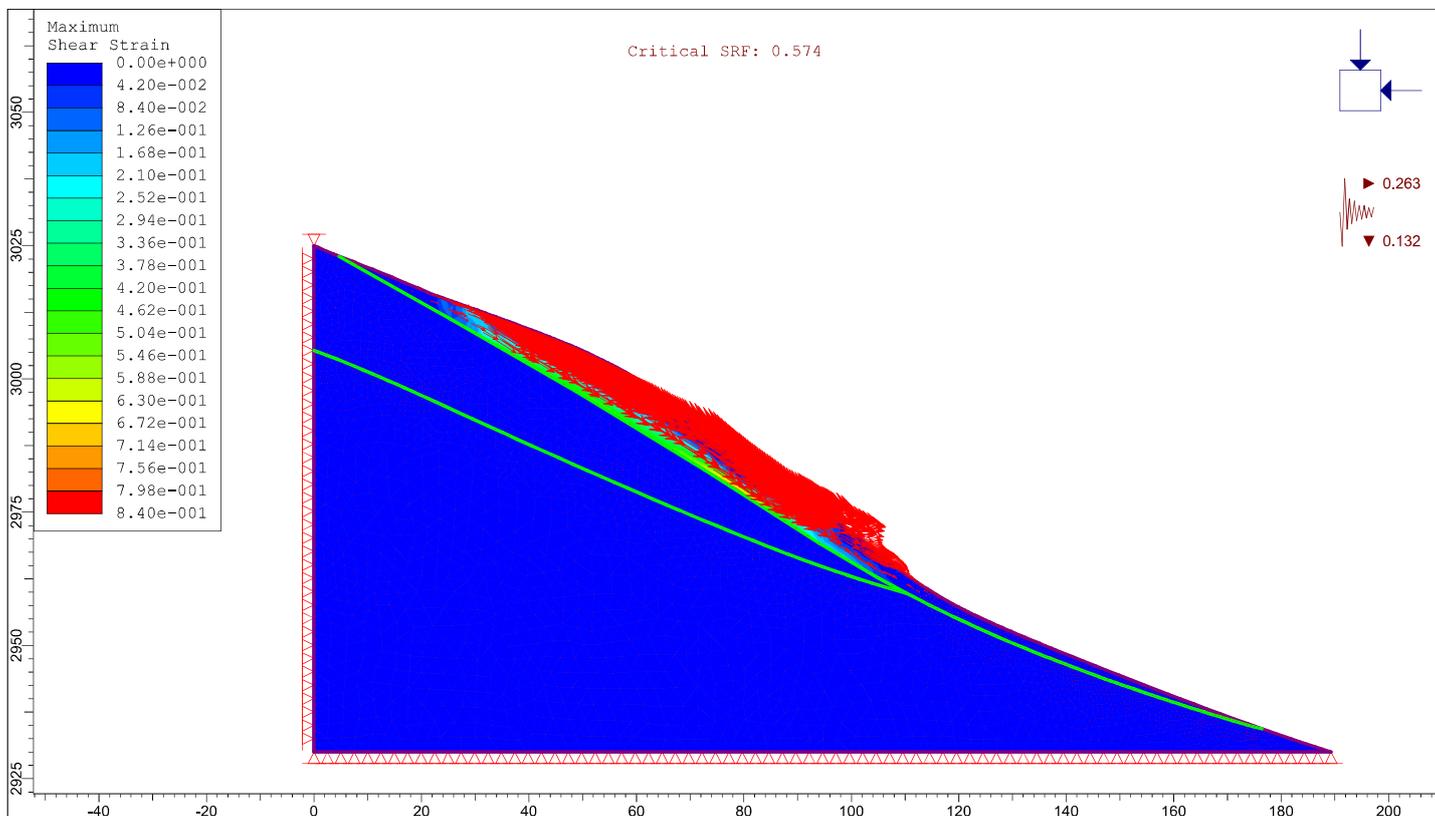
TESIS PROFESIONAL  
 APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS  
 EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISTA	SLIDE N° 50	PERFIL D-D' TALUD SAT TOT	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

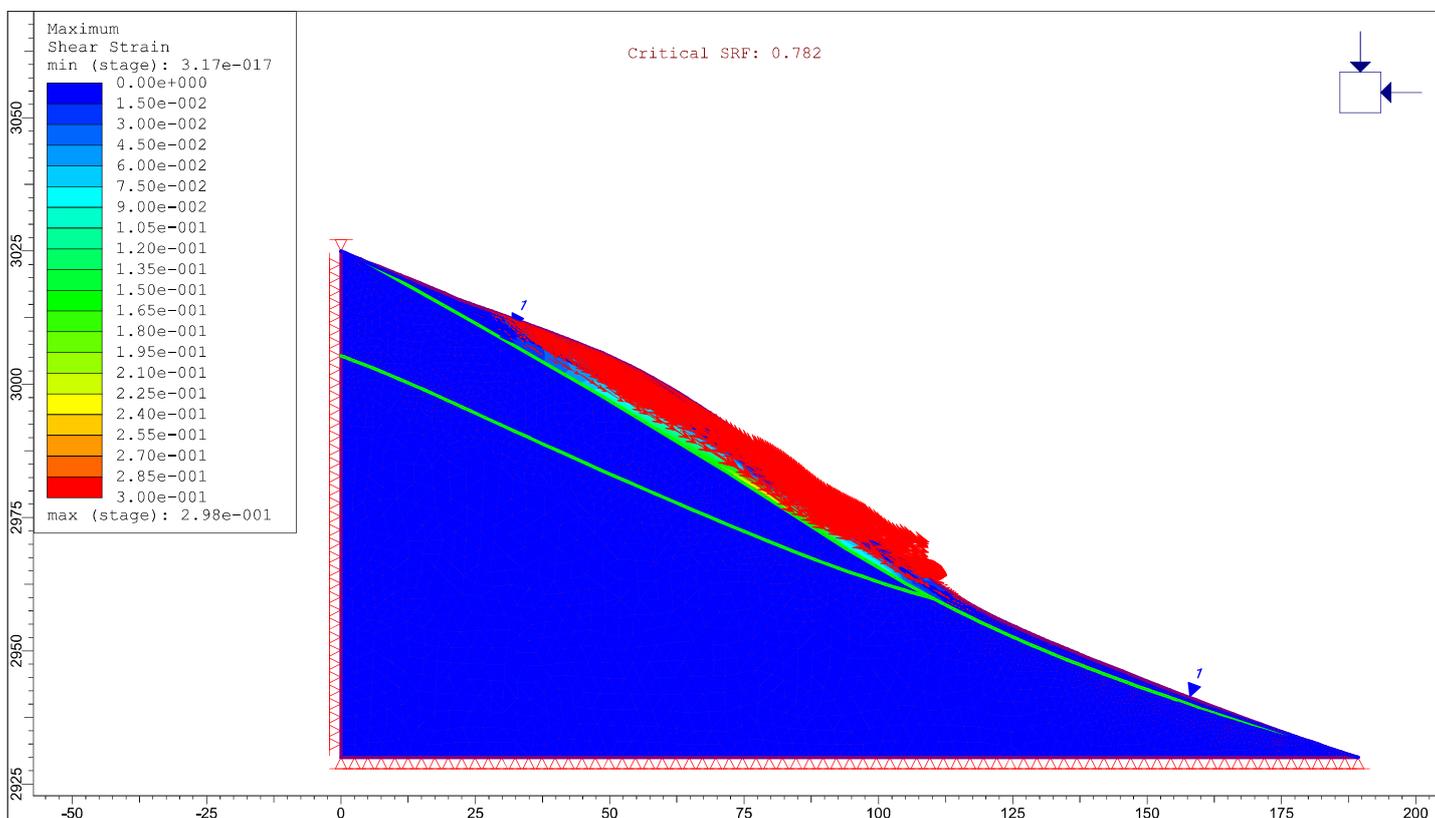


	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISIS	SLIDE N° 51	PERFIL D-D' TALUD SIS MAX Y SAT TOT	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR M.Cs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

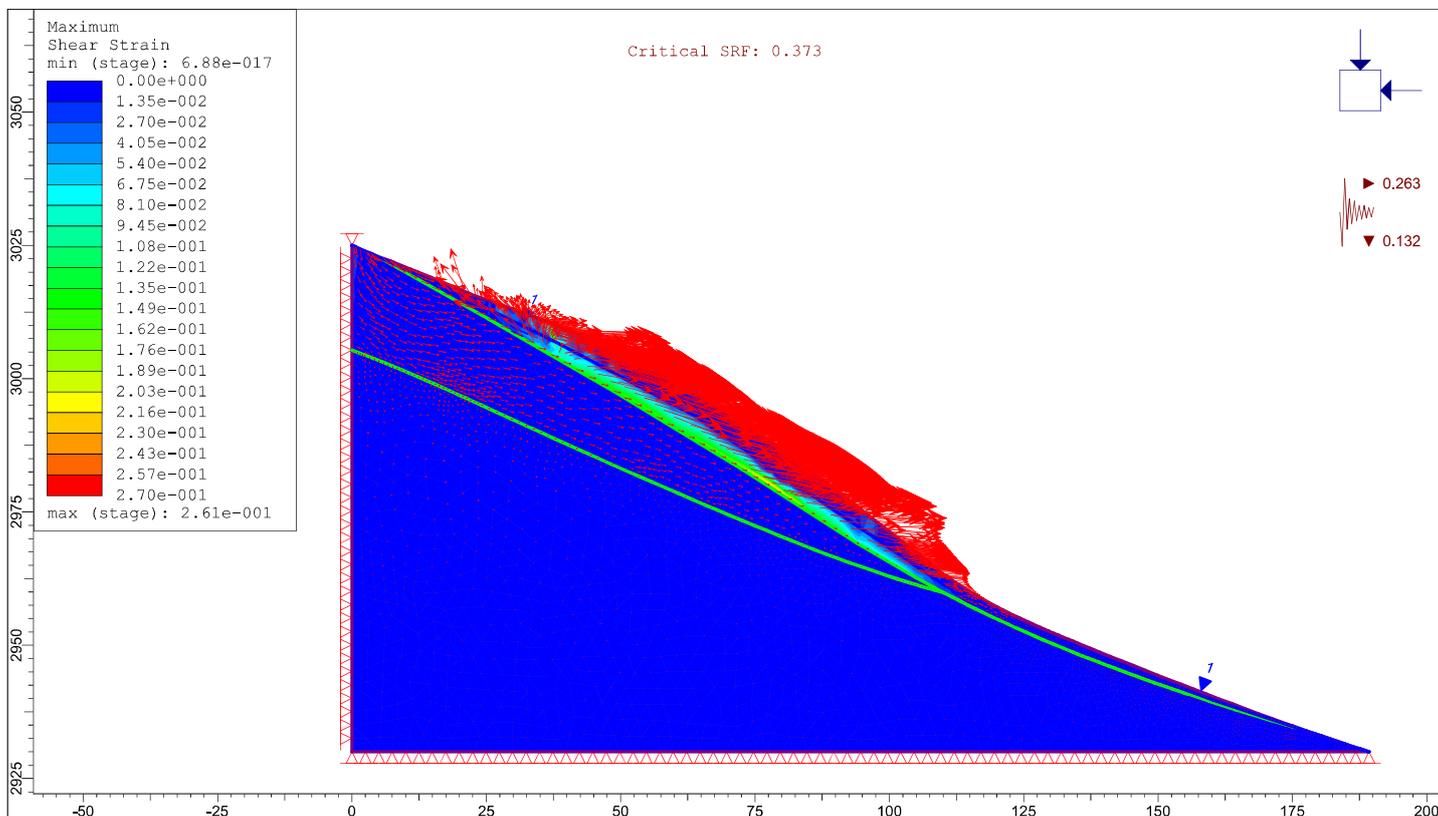




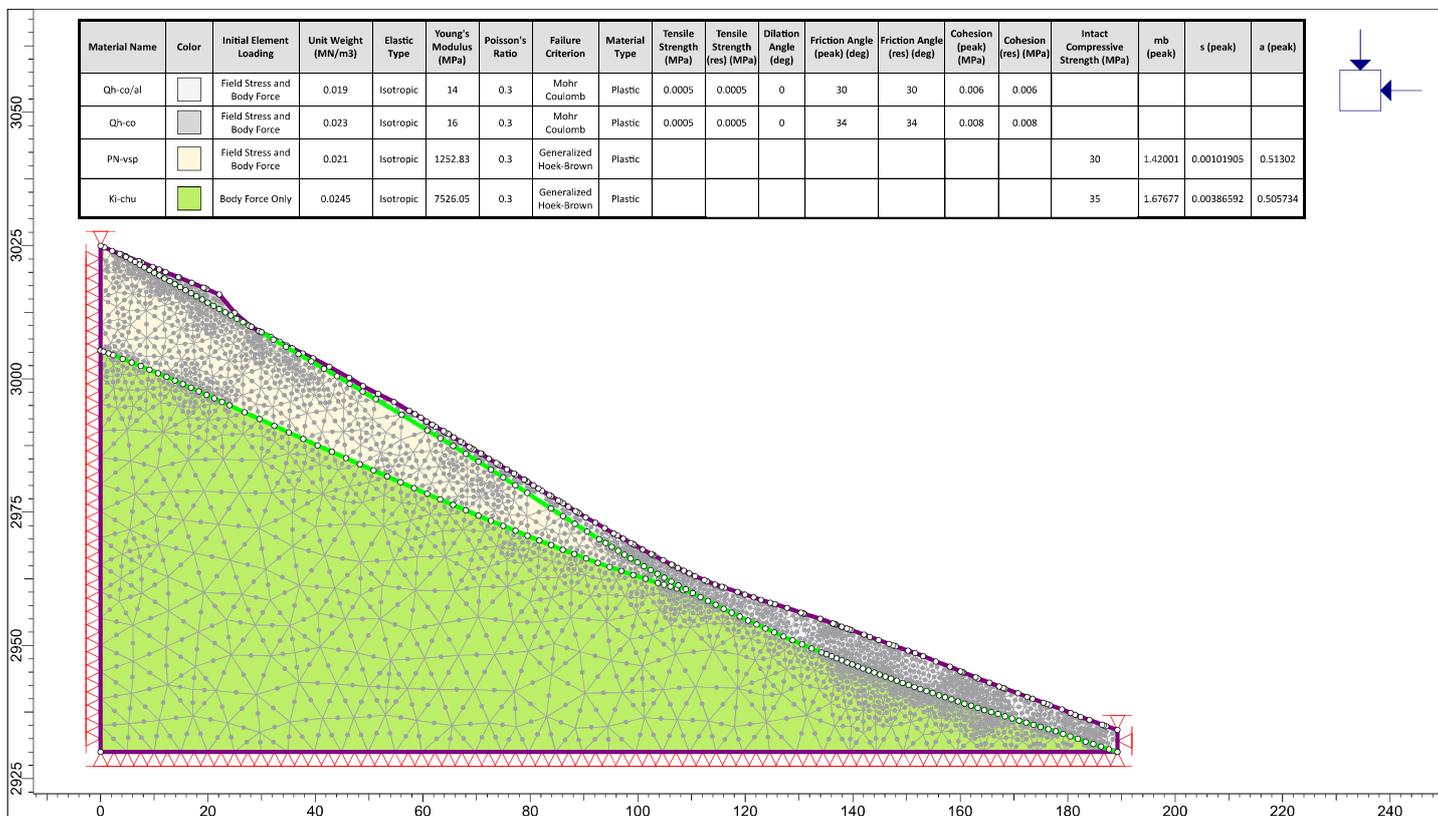
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
	ANALISIS	RS2 N°: 3	RS2 PERFIL A-A' T ORIG SIS MAX
	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016	
INTERPRET 9.016	TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



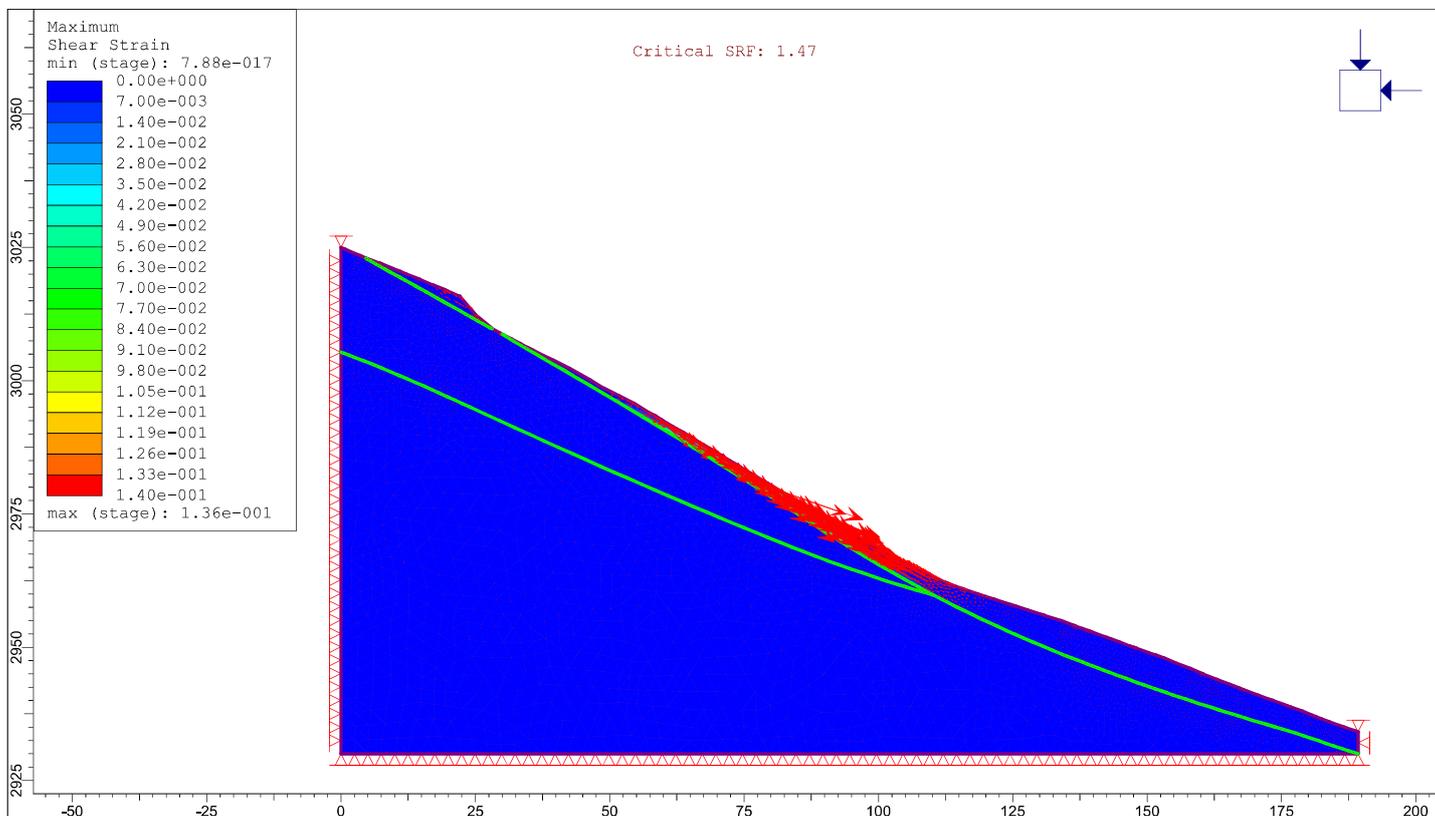
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
	ANALISIS	RS2 N°: 4	RS2 PERFIL A-A' T ORIG SAT MED
	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016	
INTERPRET 9.016	TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



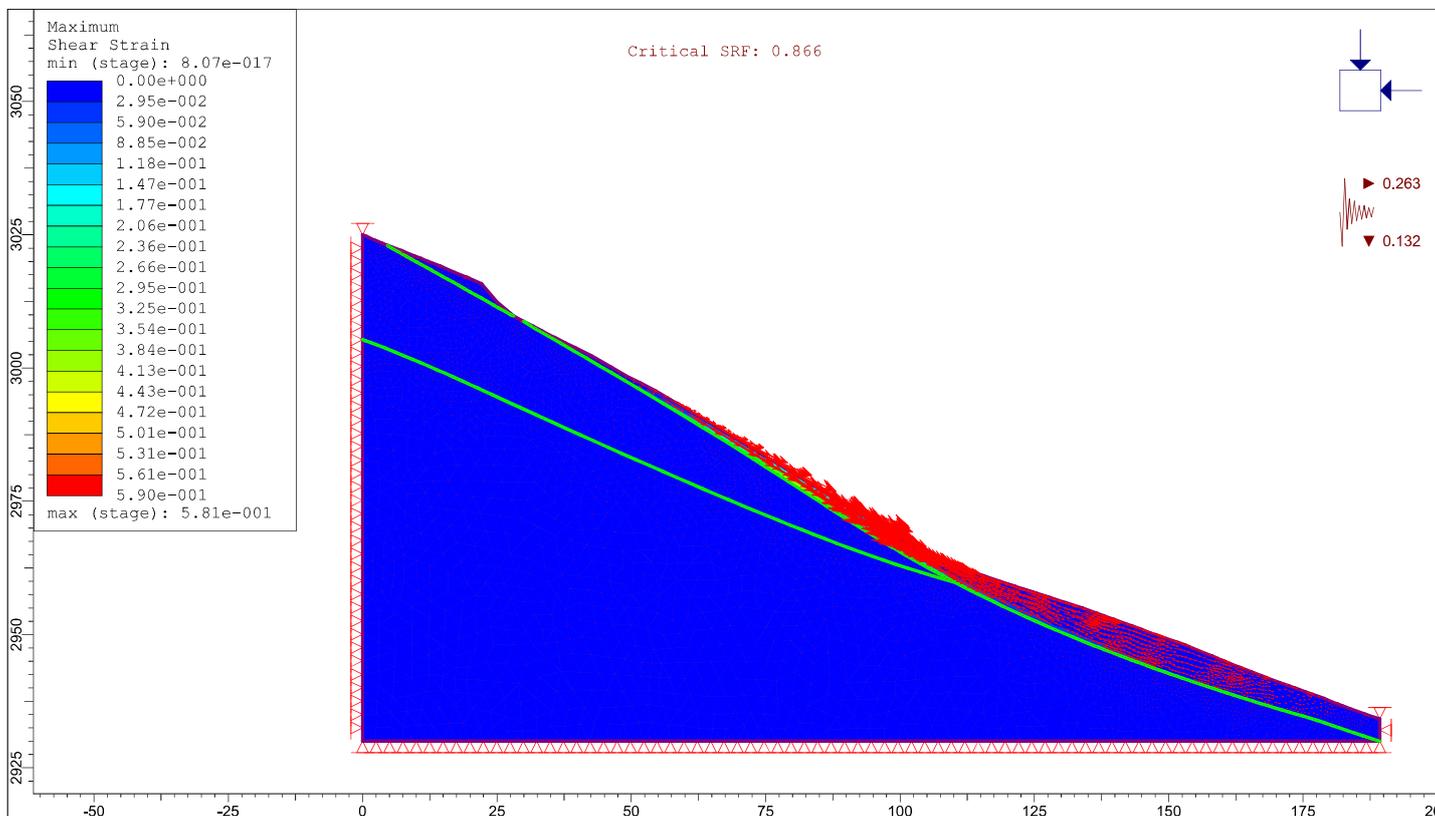
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
	APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	RS2 N°: 5	RS2 PERFIL A-A' T ORIG SIS MAX Y SAT MED	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



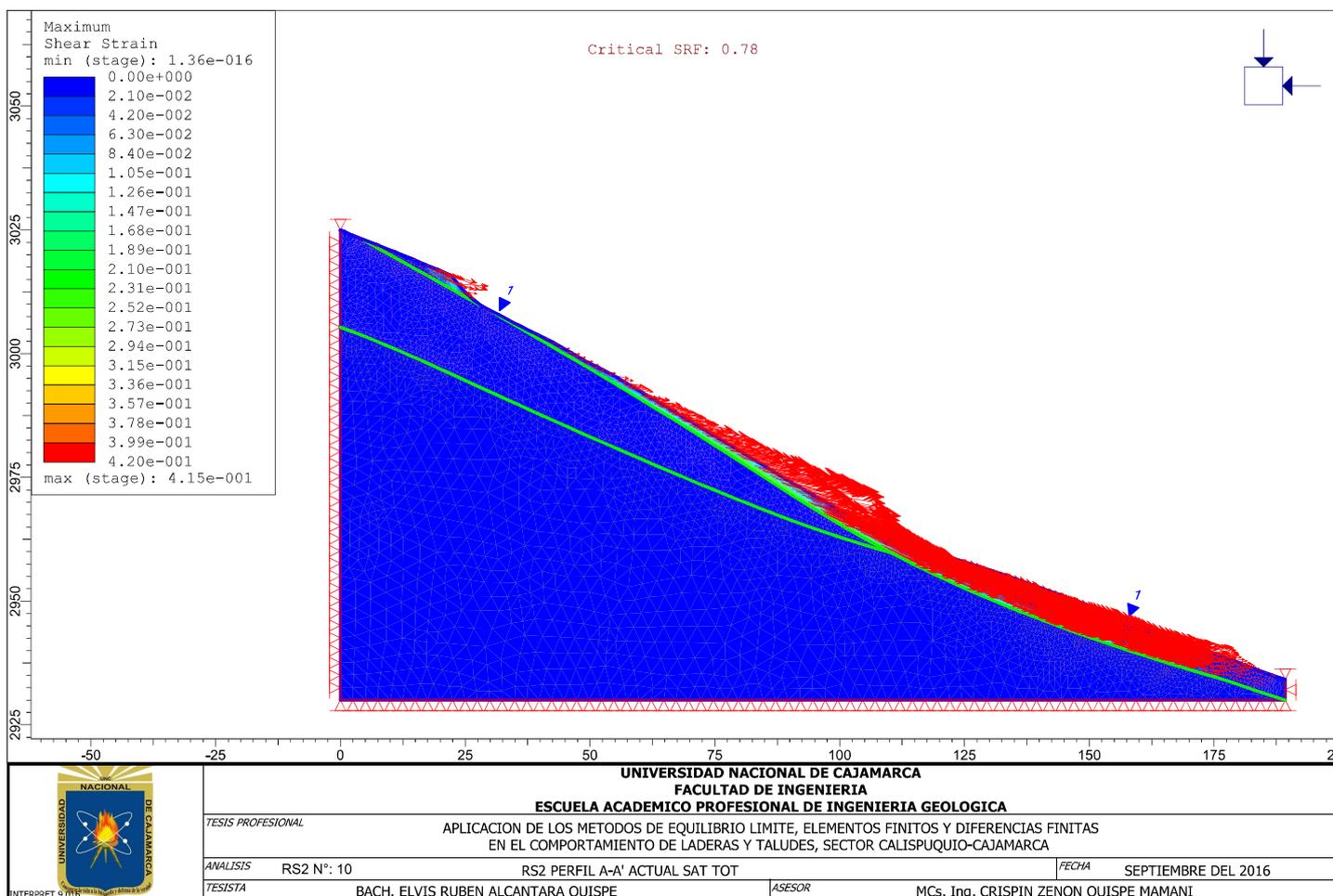
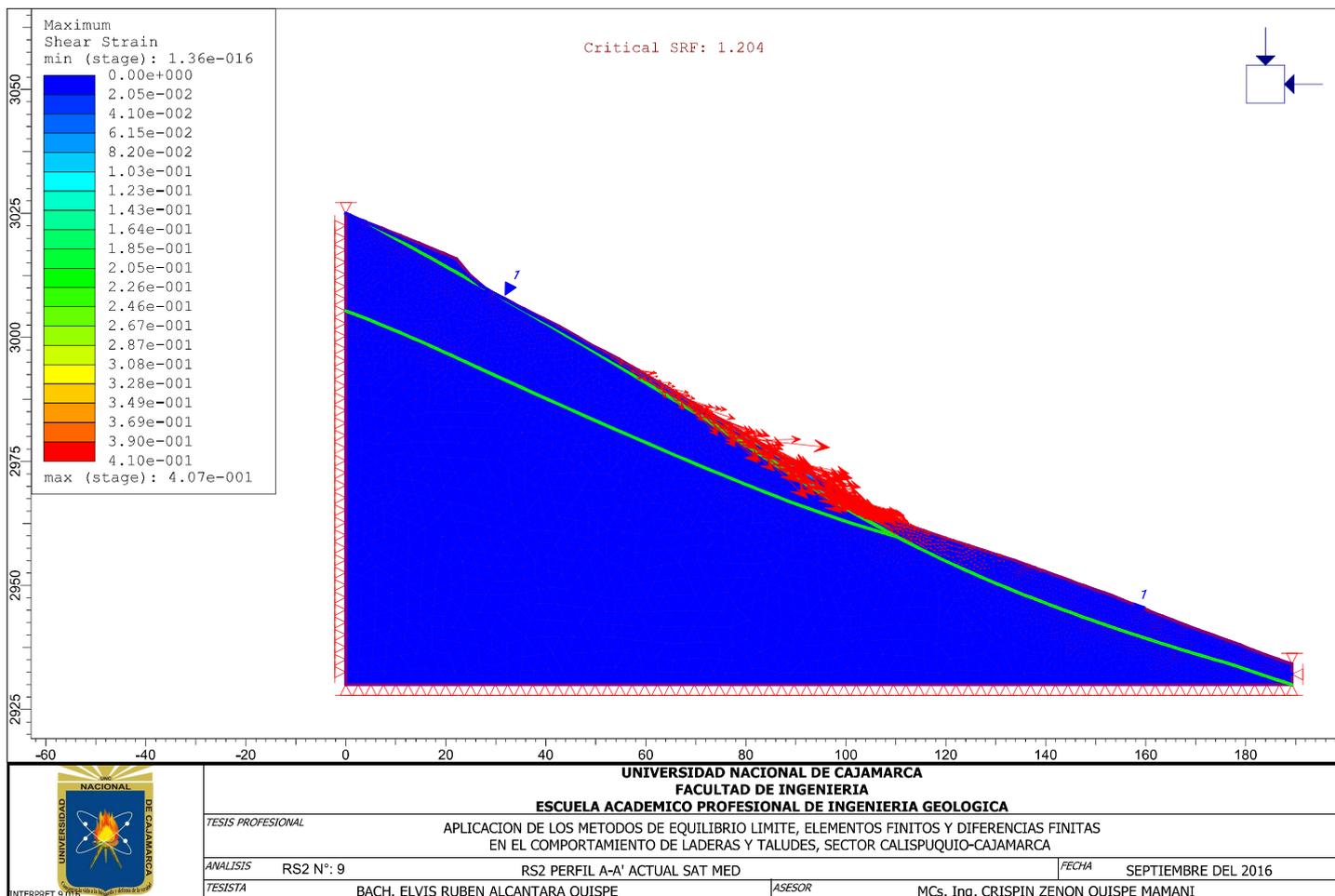
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
	APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	RS2 N°: 6	RS2 PERFIL A-A' TOPOGRAFIA ACTUAL	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

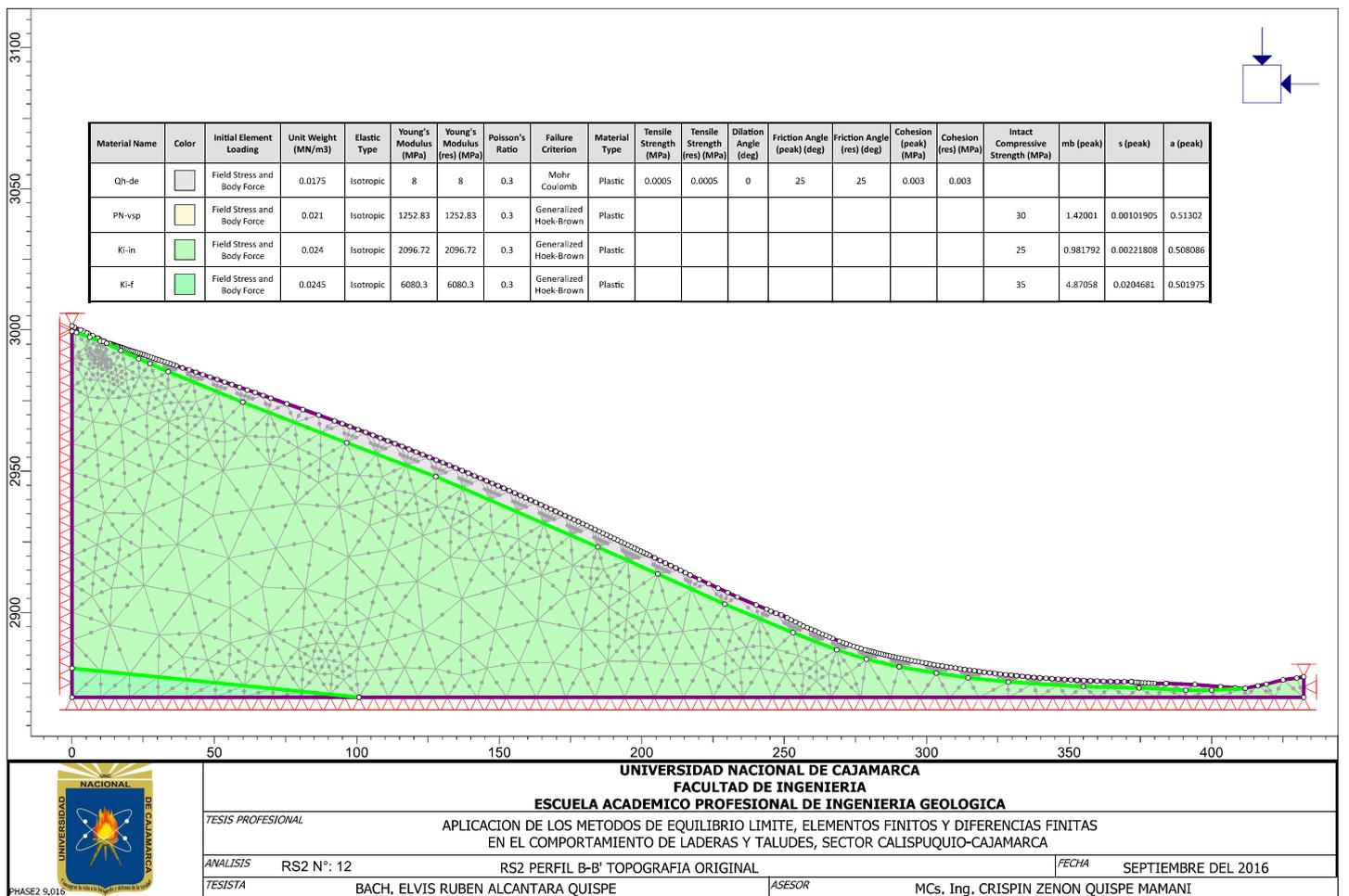
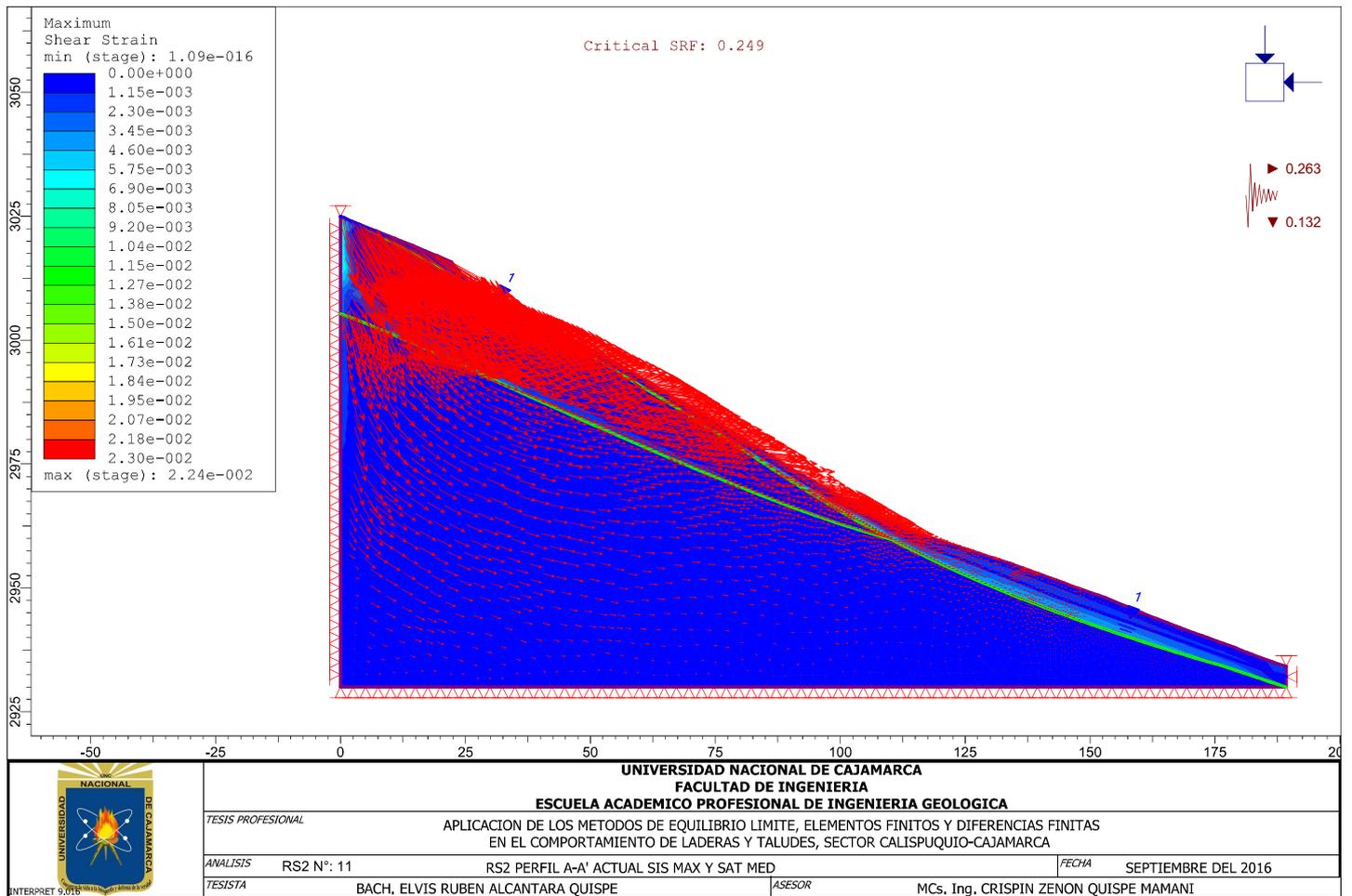


	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
	ANALISIS	RS2 N°: 7	RS2 PERFIL A-A' ACTUAL COND NORMALES
	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016	
INTERPRET 9.016	TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

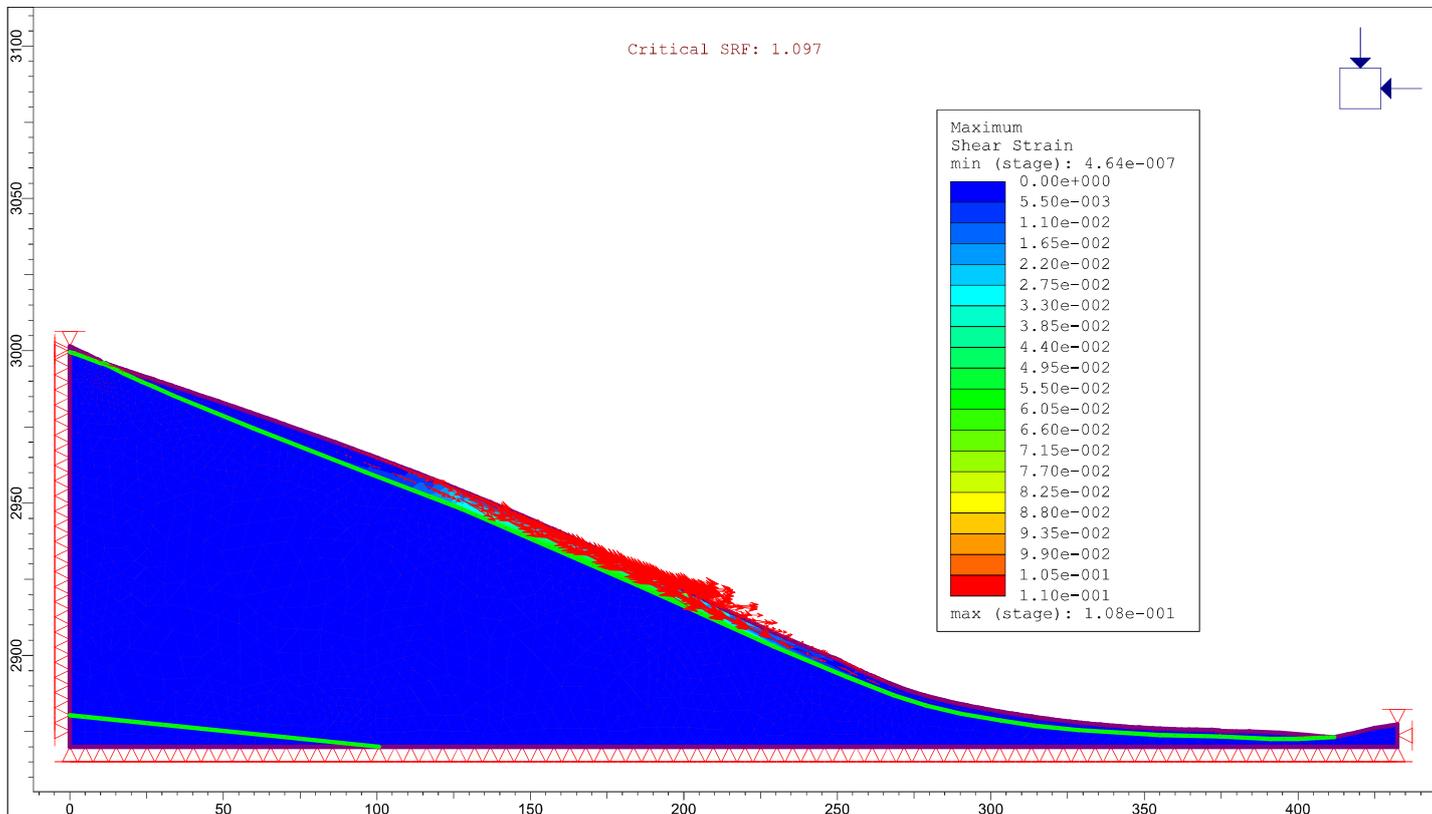


	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
	ANALISIS	RS2 N°: 8	RS2 PERFIL A-A' ACTUAL SIS MAX
	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016	
INTERPRET 9.016	TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR MCs. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



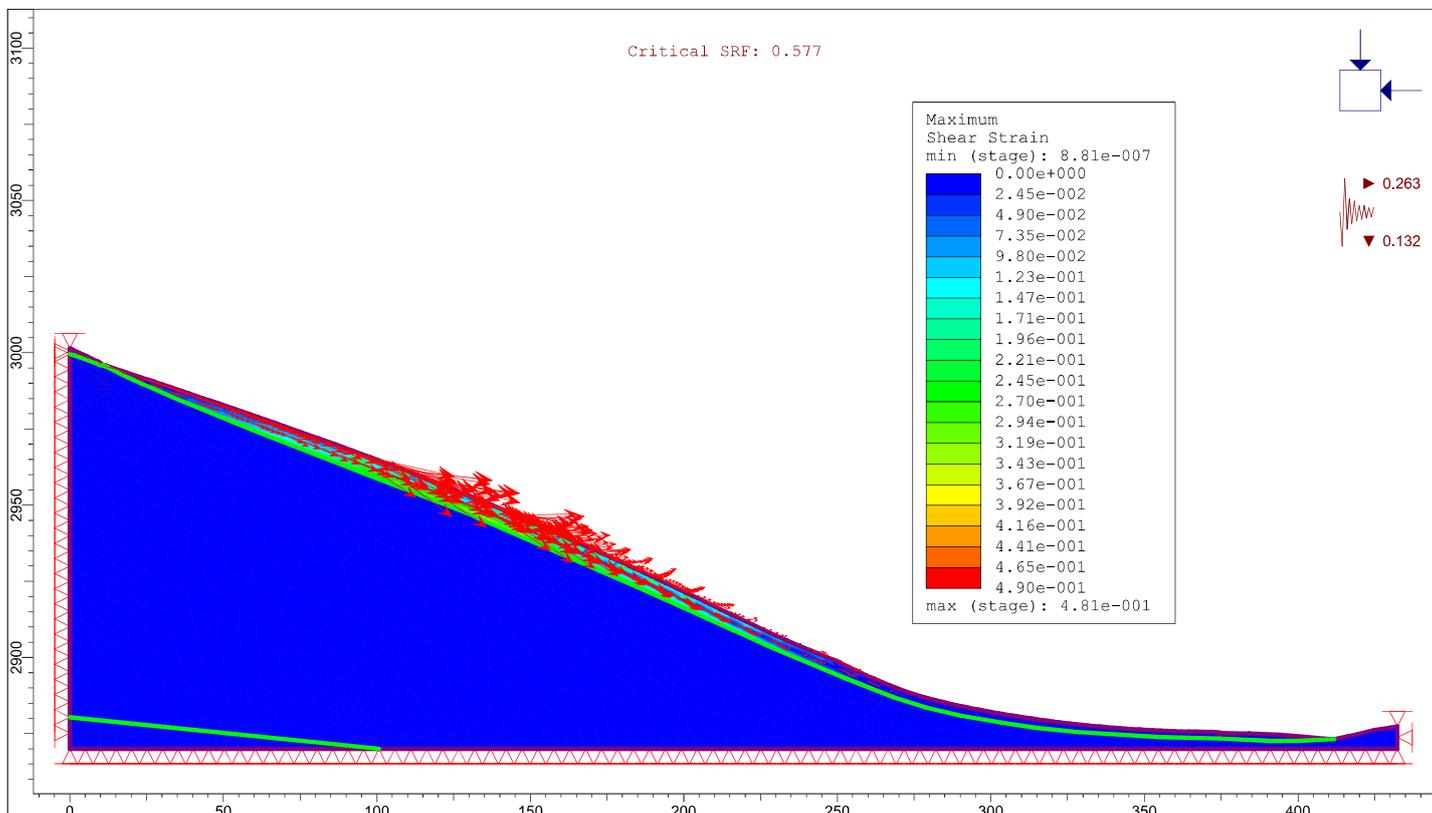


Critical SRF: 1.097



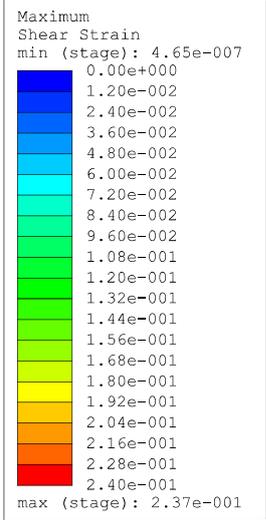
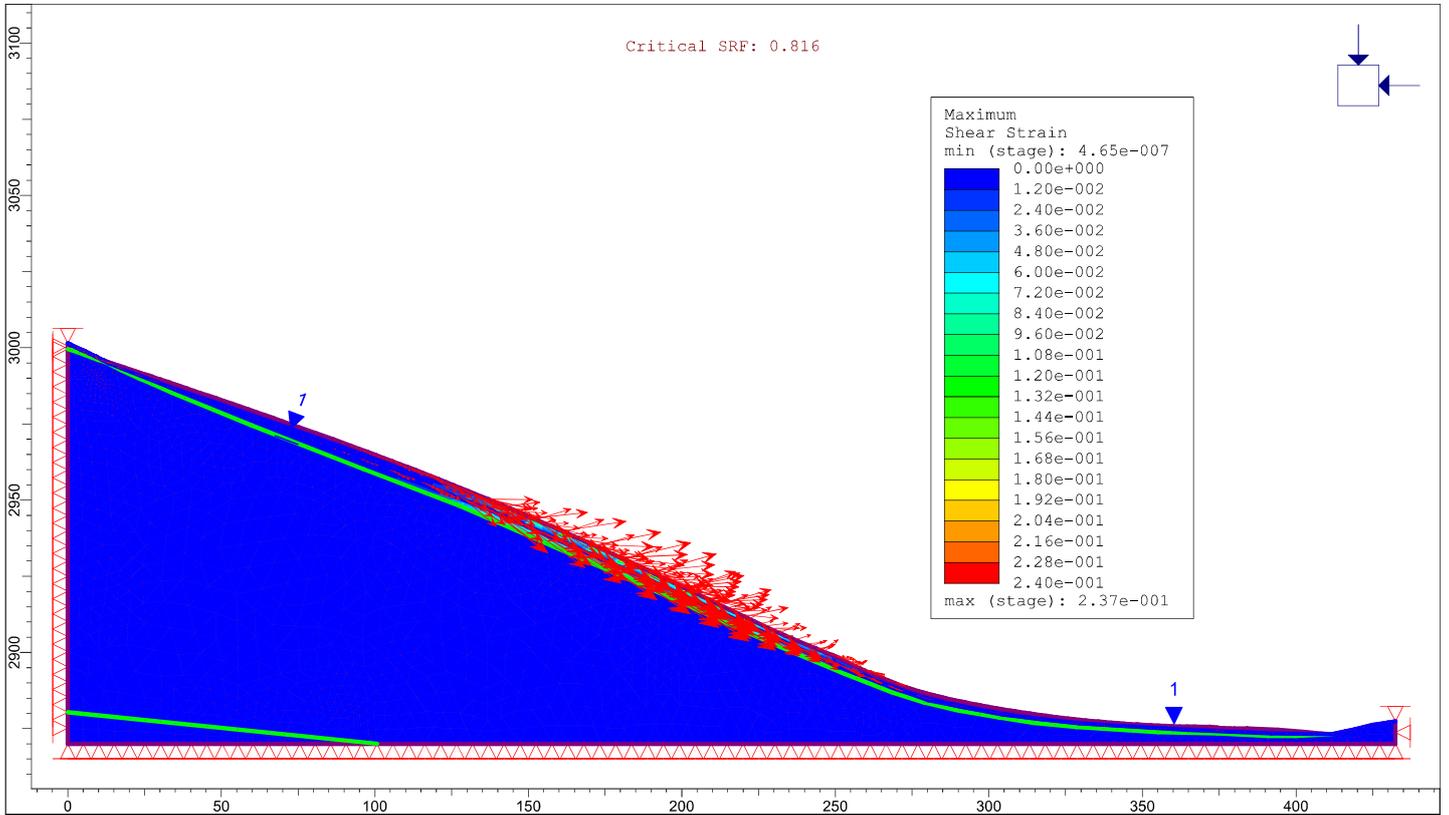
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISTA	RS2 N°: 13	RS2 PERFIL B-B' T ORIG COND NORMALES	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

Critical SRF: 0.577



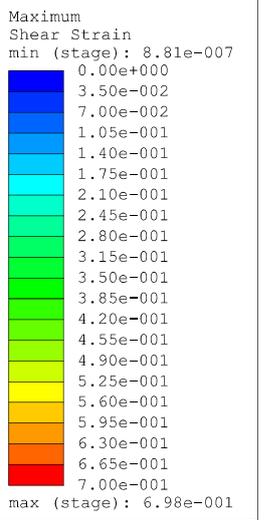
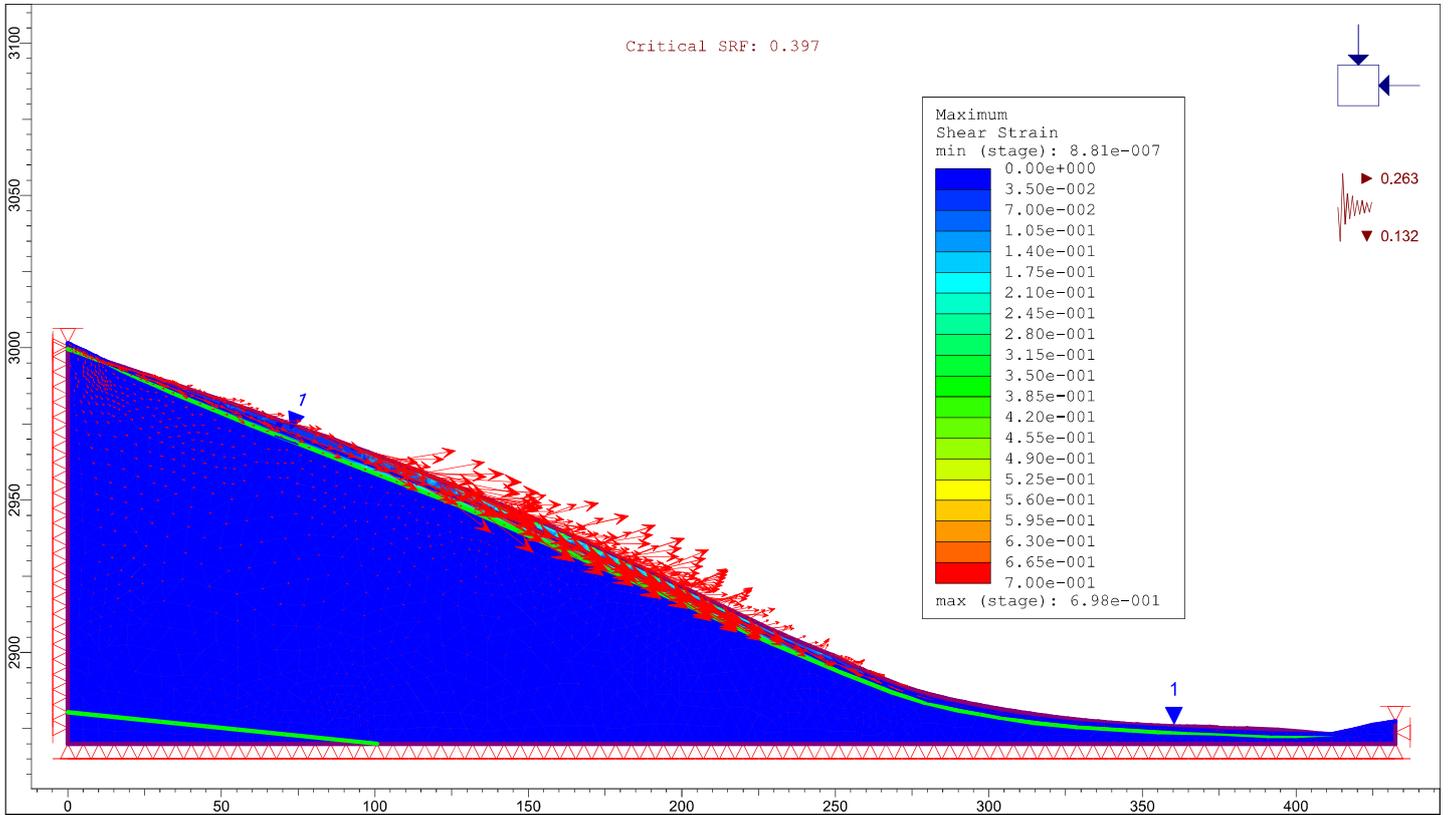
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISTA	RS2 N°: 14	RS2 PERFIL B-B' T ORIG SIS MAX	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

Critical SRF: 0.816

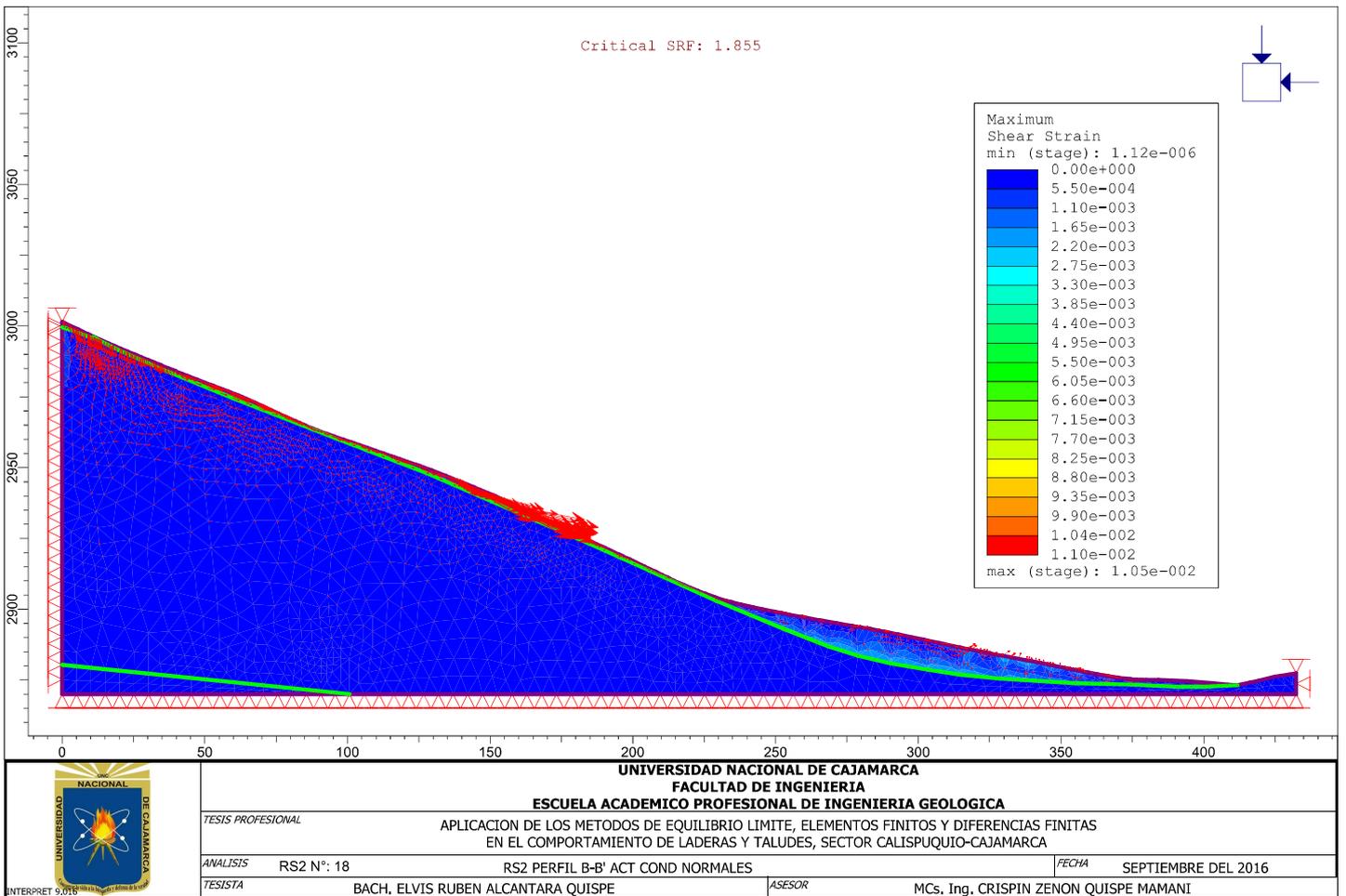
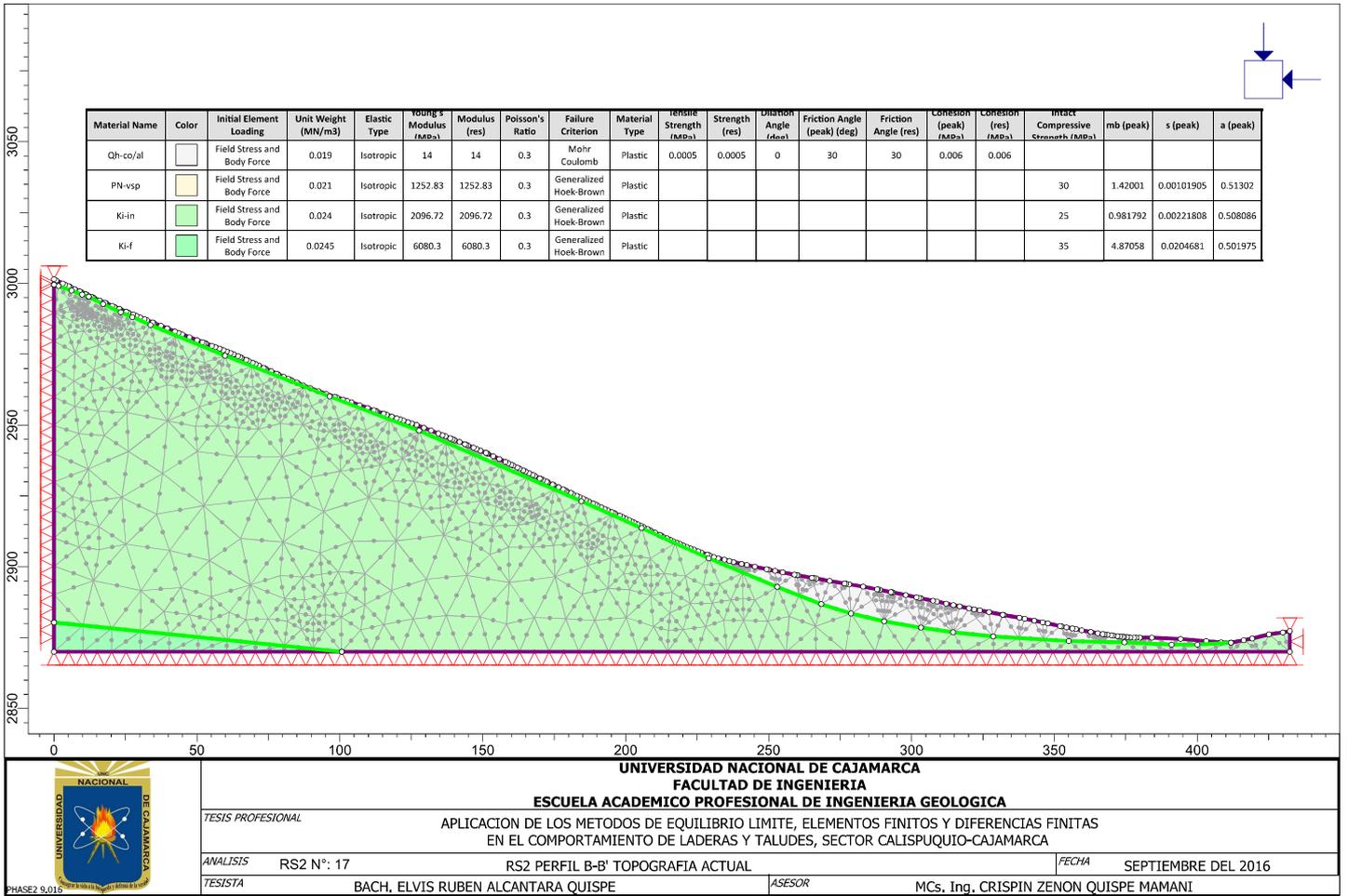


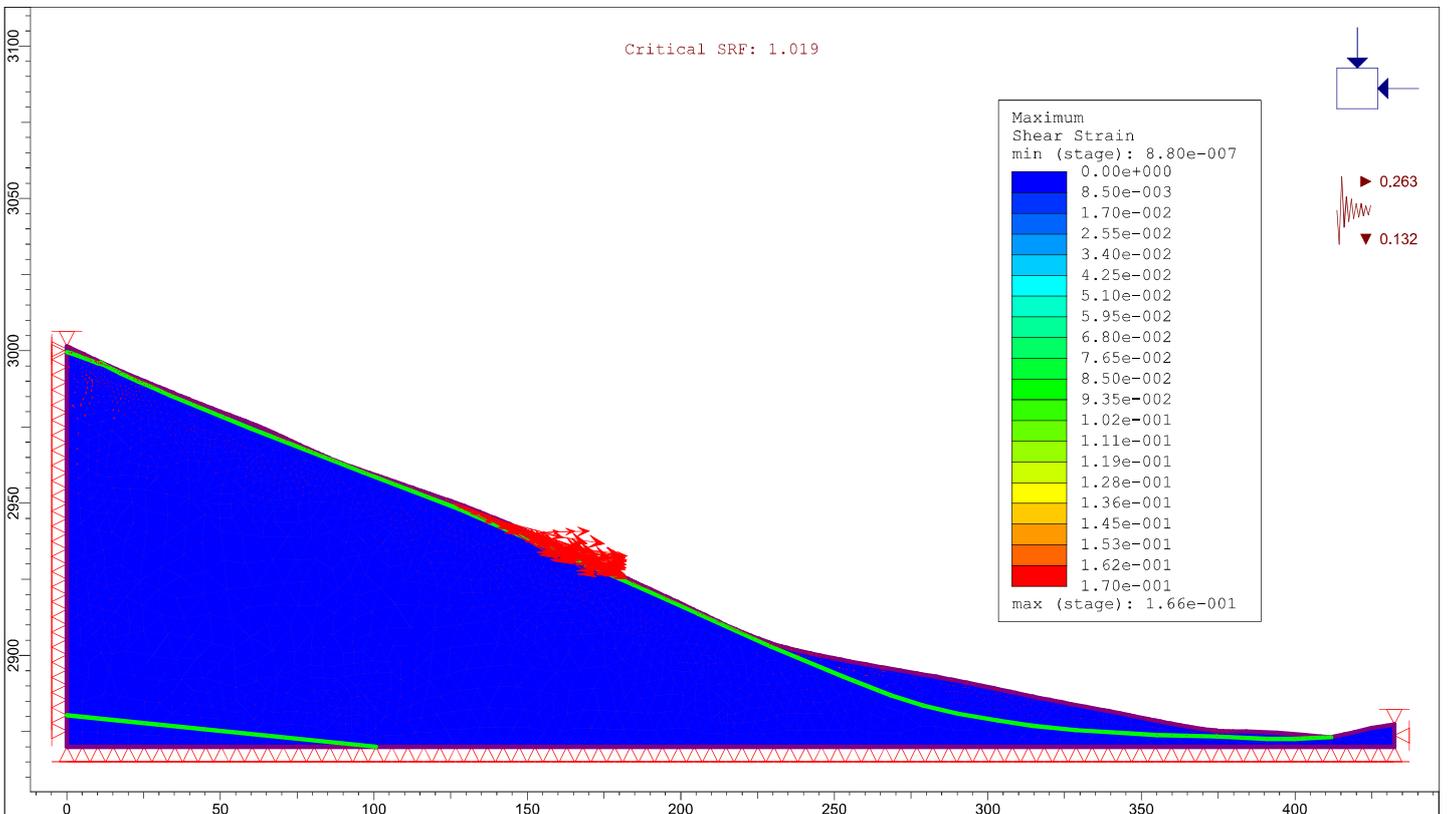
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISIS	RS2 N°: 15	RS2 PERFIL B-B' T ORIG SAT MED	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

Critical SRF: 0.397

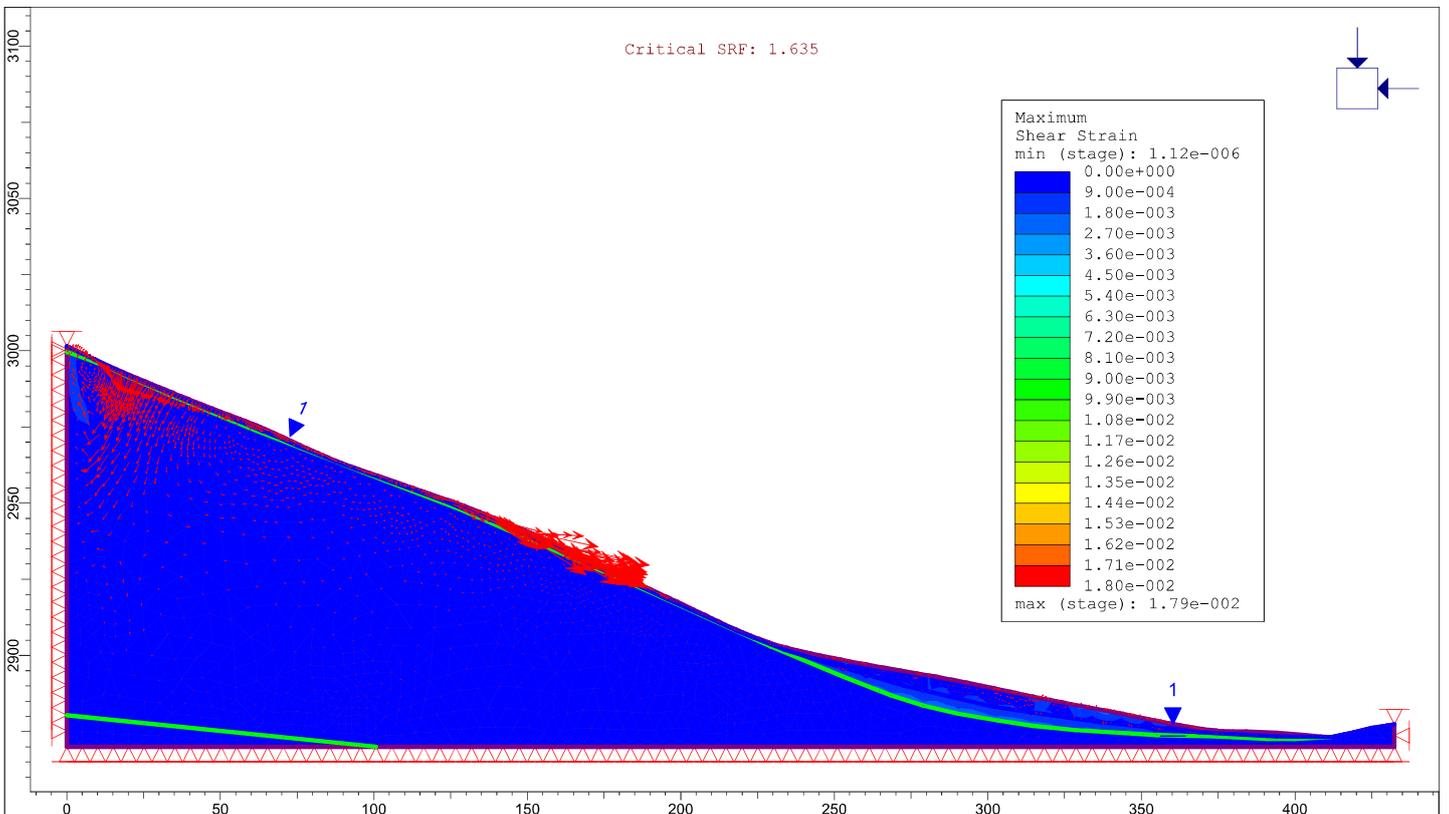


	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISIS	RS2 N°: 16	RS2 PERFIL B-B' T ORIG SIS MAX Y SAT MED	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



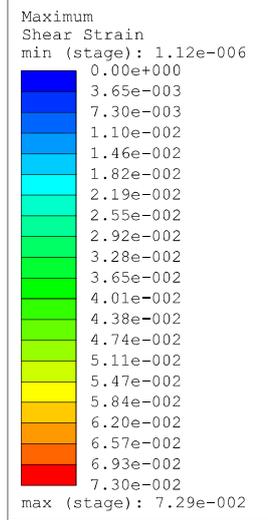
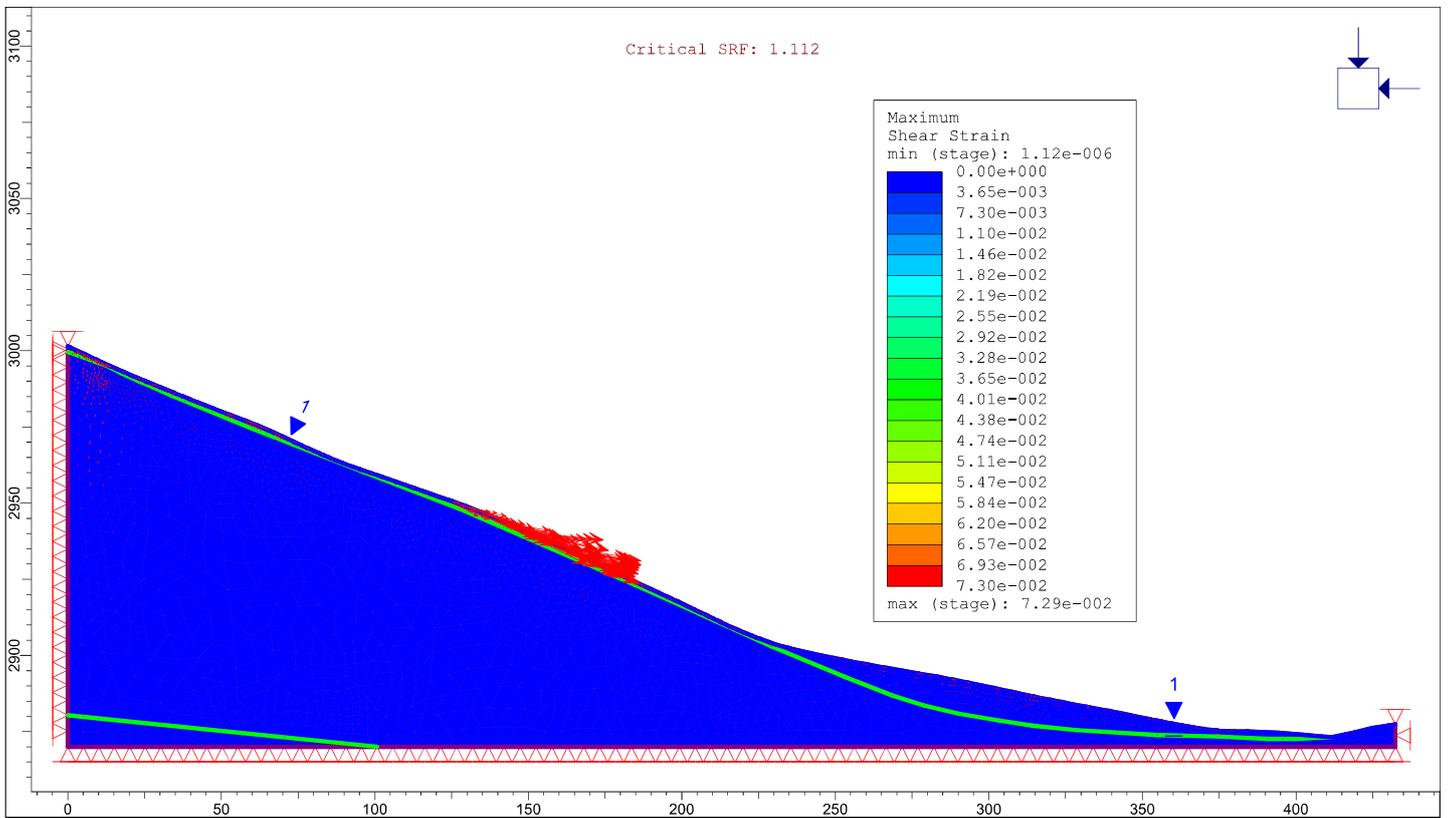


	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
<i>ANALISIS</i>	RS2 N°: 19	RS2 PERFIL B-B' ACT SIS MAX	<i>FECHA</i> SEPTIEMBRE DEL 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		<i>ASESOR</i> MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



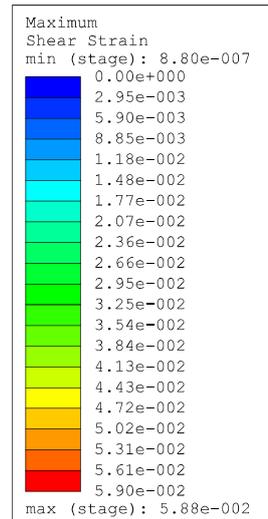
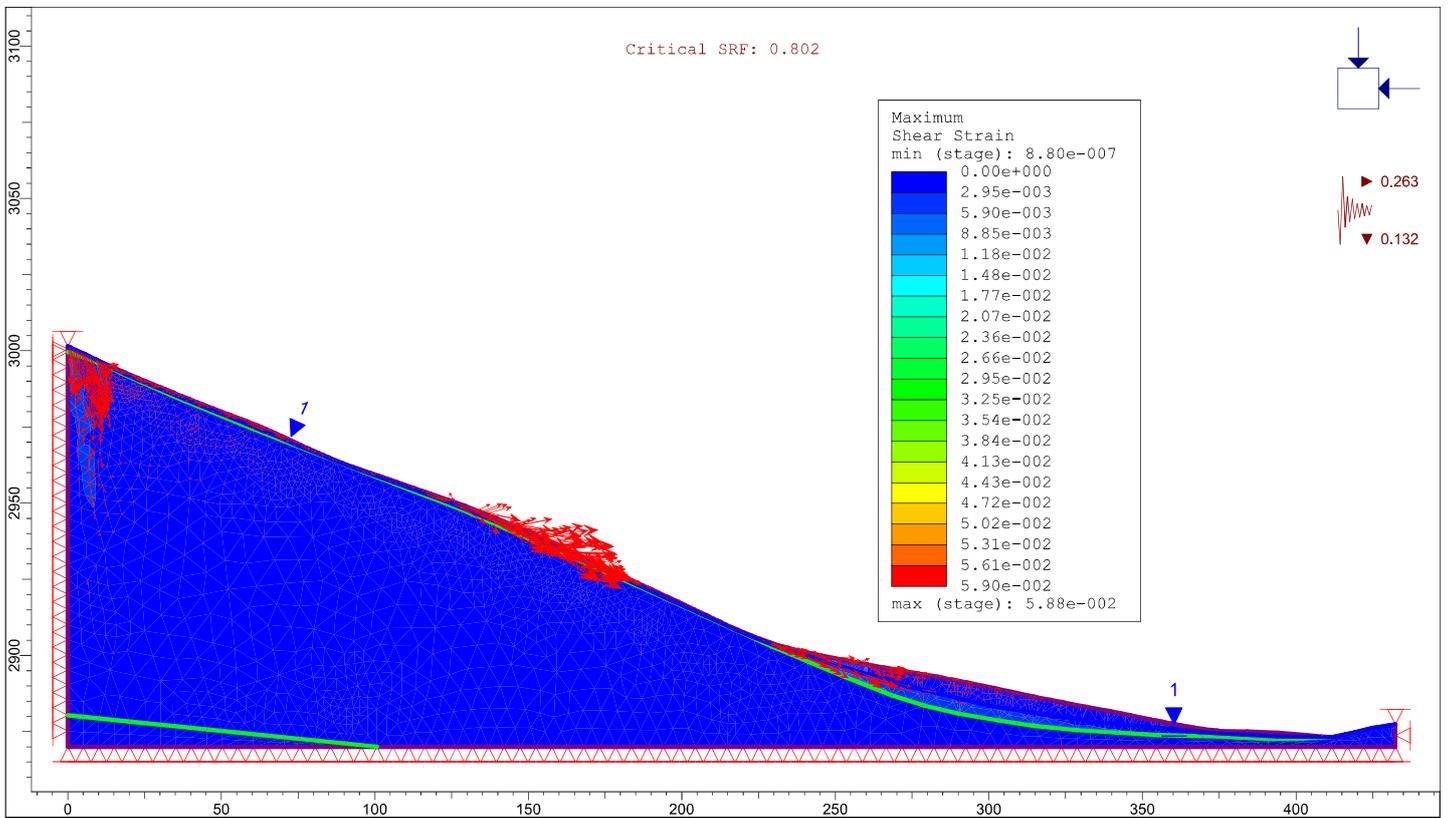
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
<i>ANALISIS</i>	RS2 N°: 20	RS2 PERFIL B-B' ACT SAT MED	<i>FECHA</i> SEPTIEMBRE DEL 2016
<i>TESISTA</i>	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		<i>ASESOR</i> MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

Critical SRF: 1.112

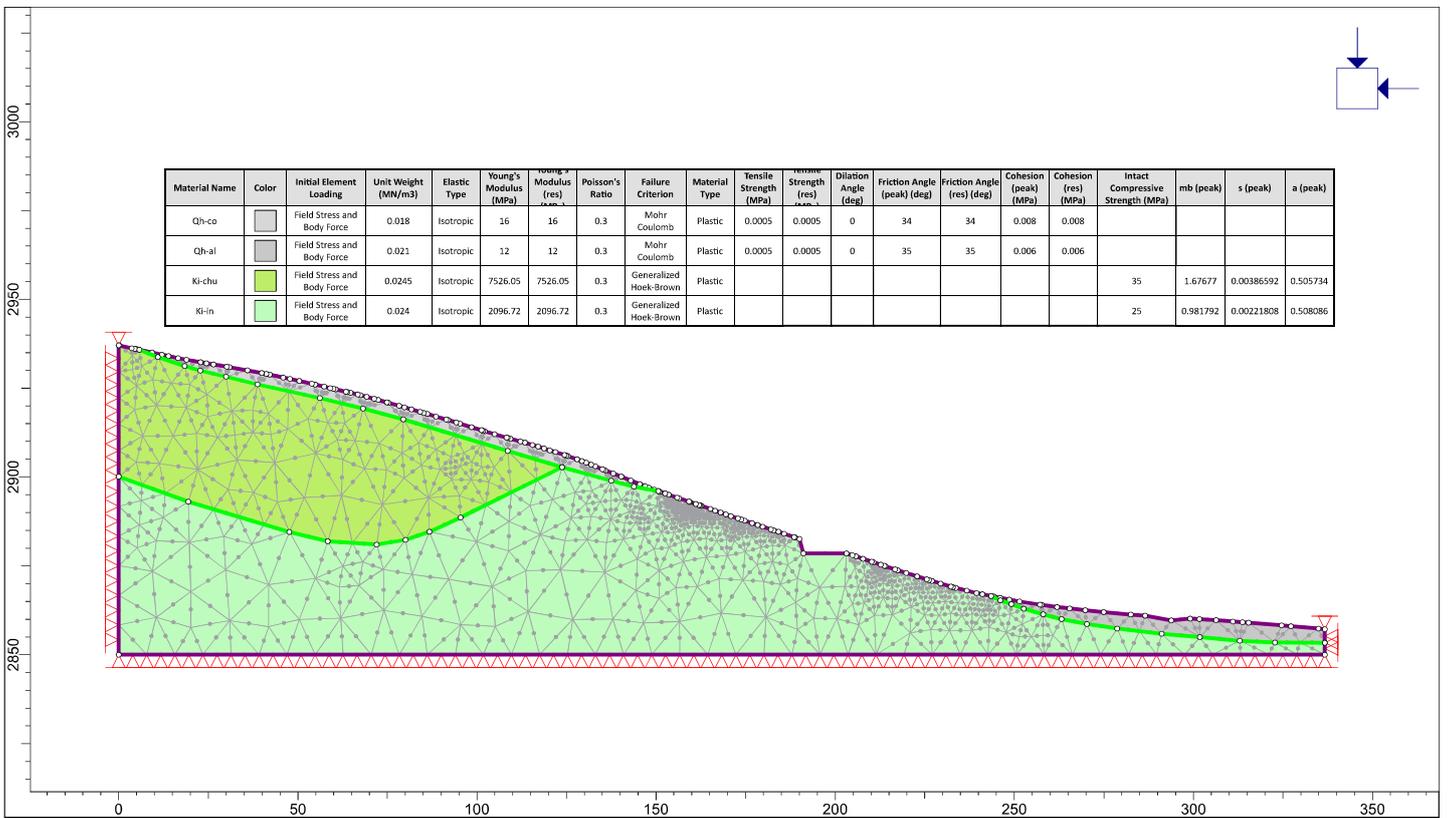


<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	RS2 N°: 21	RS2 PERFIL B-B' ACT SAT TOT	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

Critical SRF: 0.802



<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISIS	RS2 N°: 22	RS2 PERFIL B-B' ACT SIS MAX Y SAT MED	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR	MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI





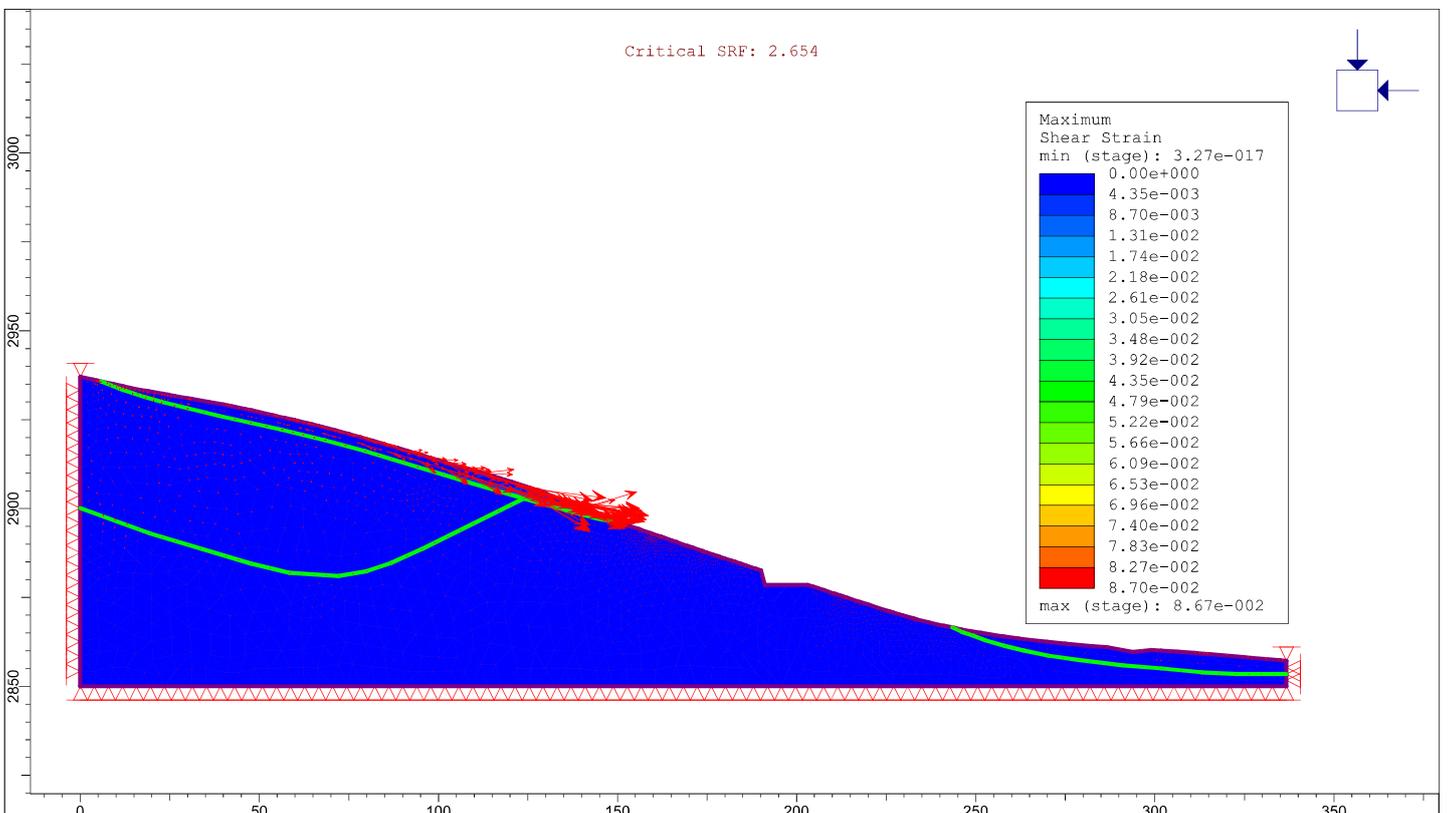
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

TESIS PROFESIONAL

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS    RS2 N°: 23    RS2 PERFIL C-C'    FECHA    SEPTIEMBRE DEL 2016

TESISTA    BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE    ASESOR    MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**

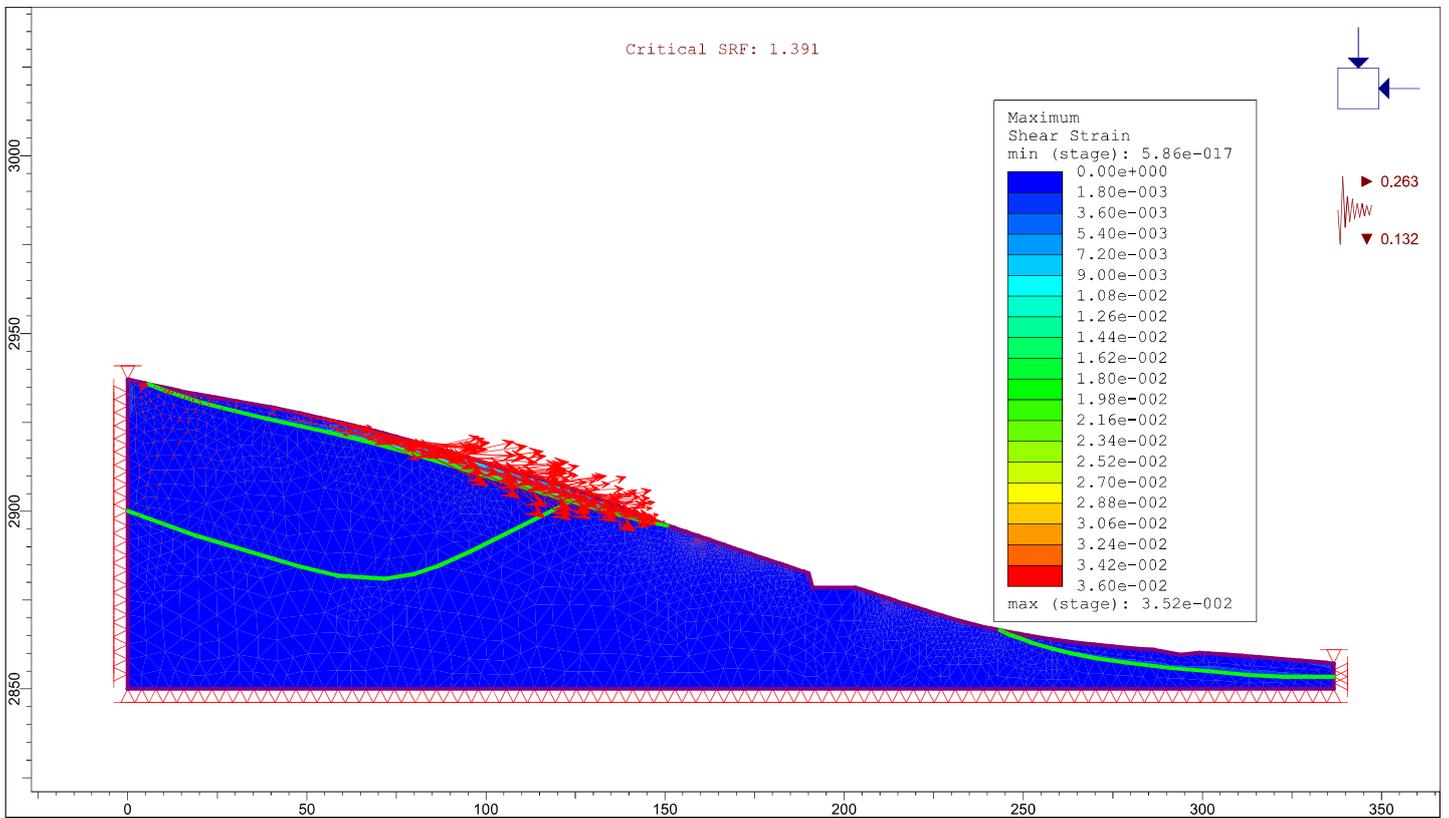
TESIS PROFESIONAL

APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA

ANALISIS    RS2 N°: 24    RS2 PERFIL C-C' COND NORMALES    FECHA    SEPTIEMBRE DEL 2016

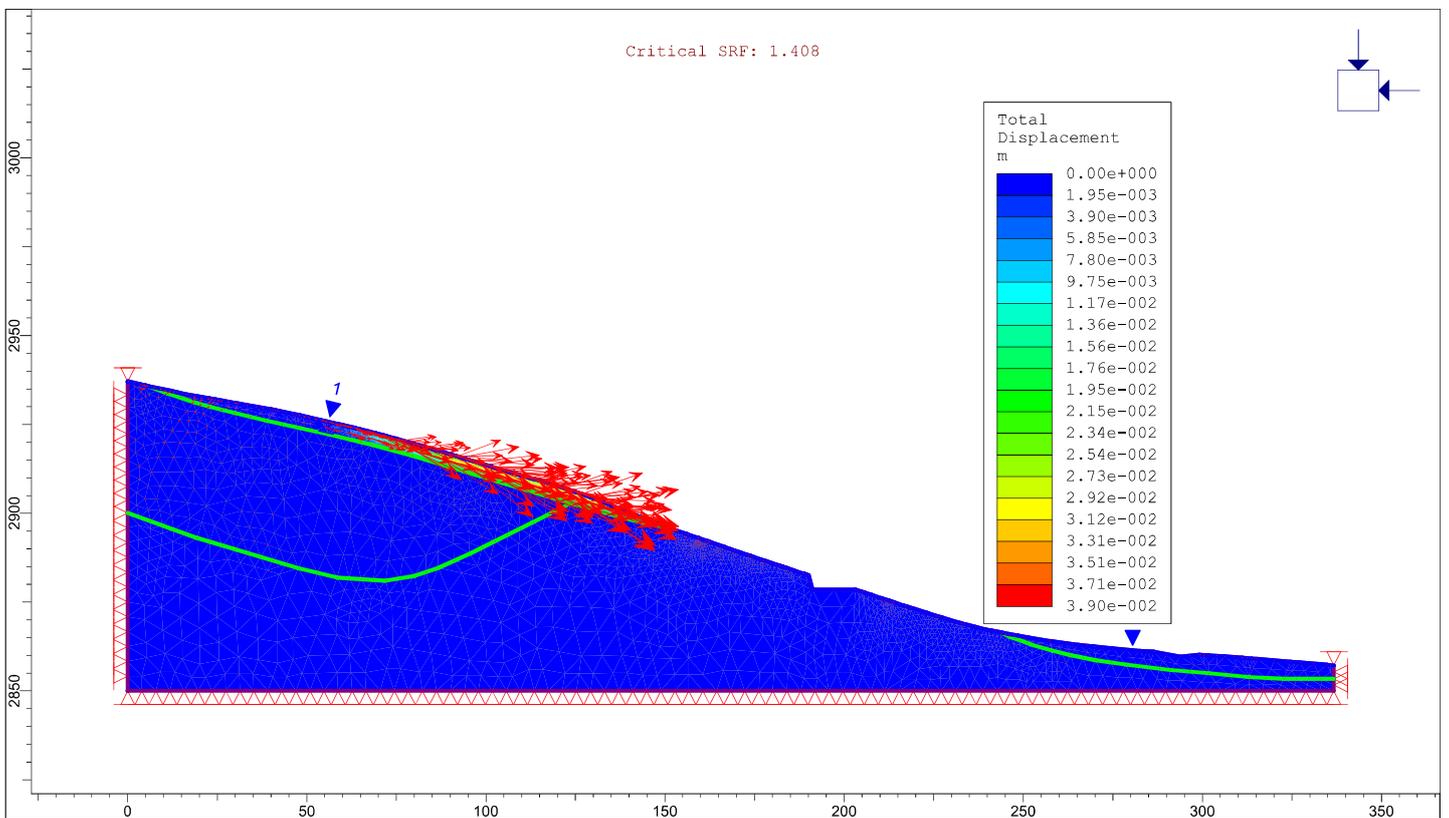
TESISTA    BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE    ASESOR    MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

Critical SRF: 1.391



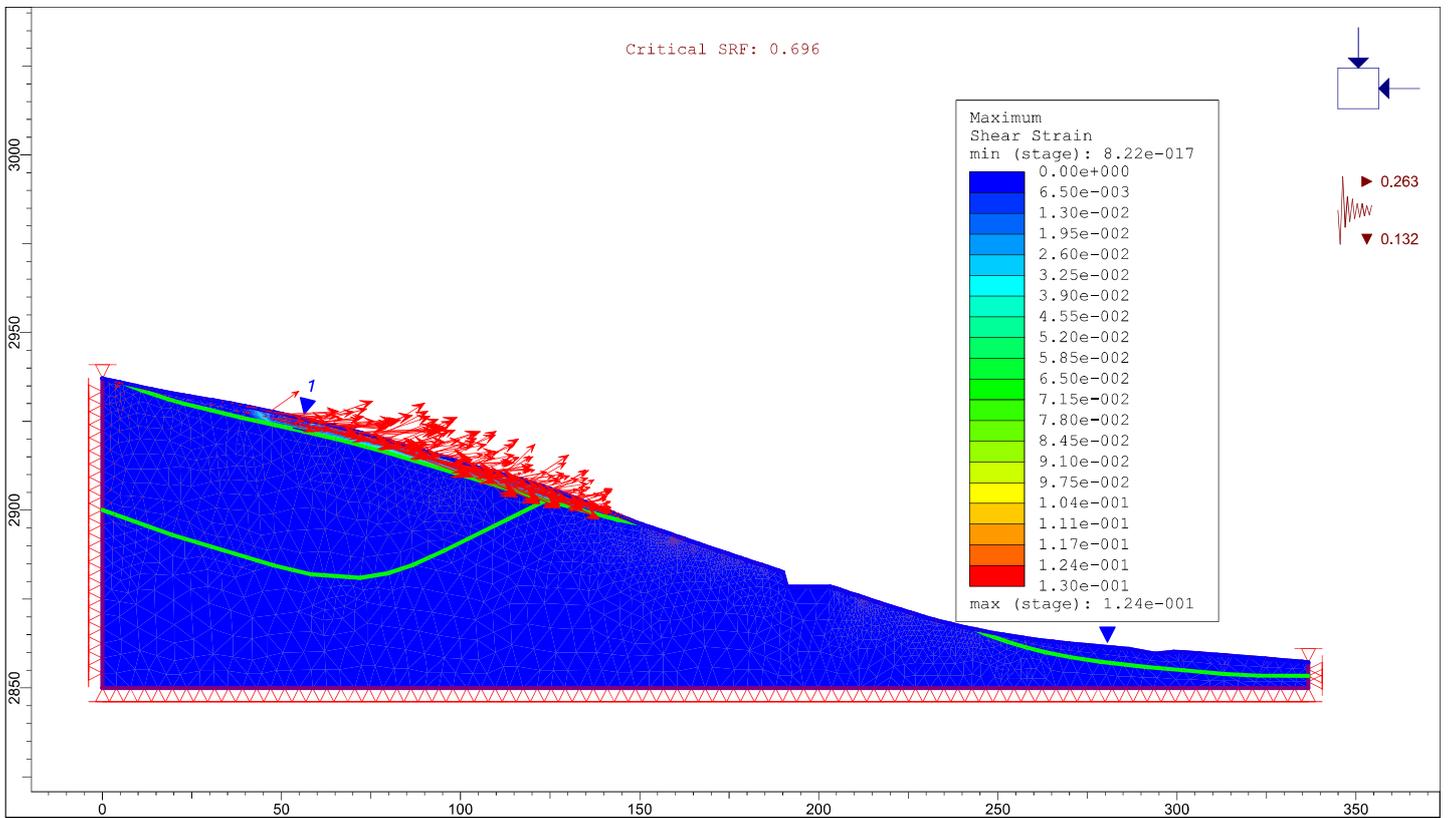
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
	ANALISIS	RS2 N°: 25	RS2 PERFIL C-C' SIS MAX
	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016	
INTERPRET 9.016	TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

Critical SRF: 1.408

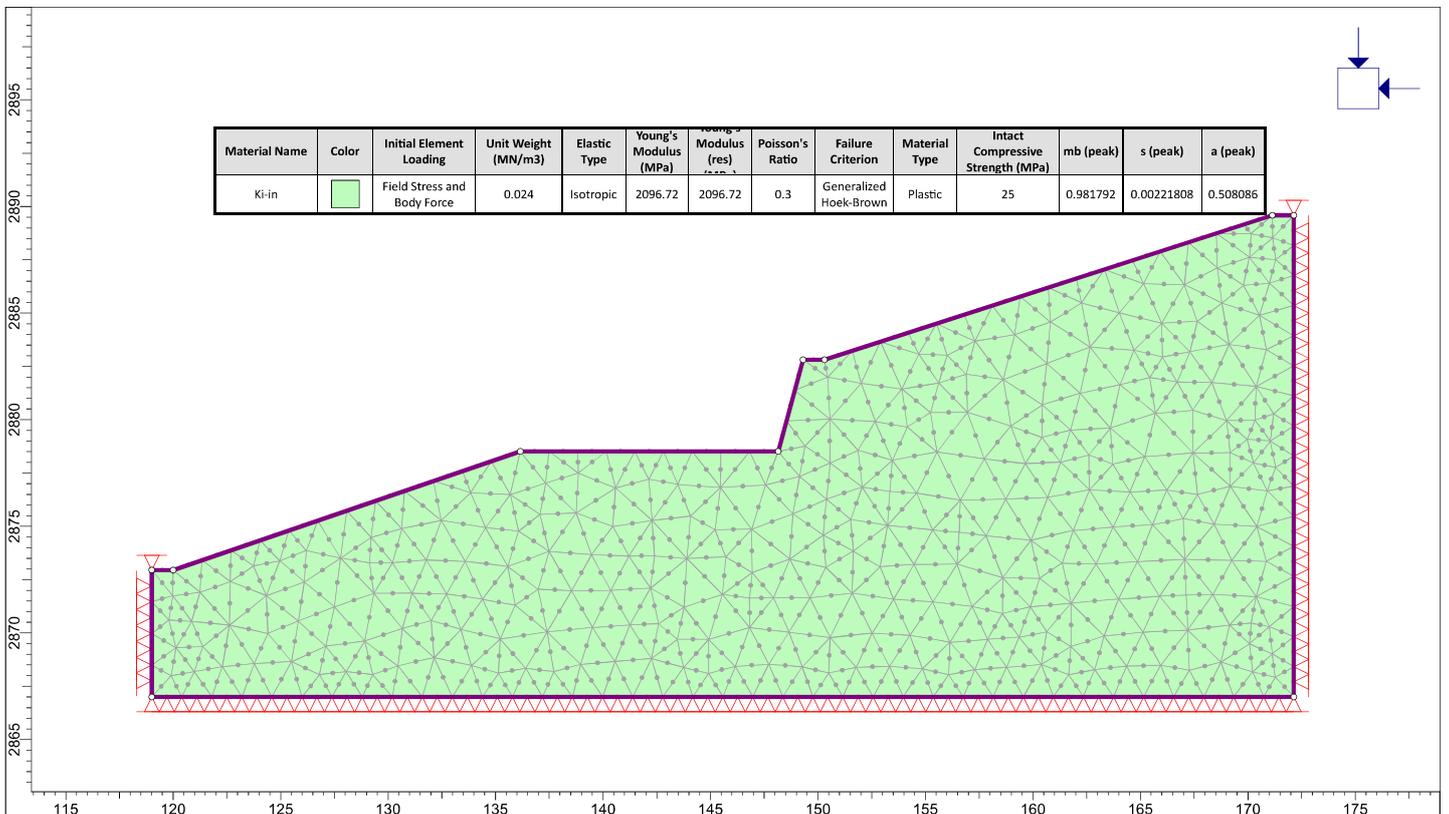


	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
	ANALISIS	RS2 N°: 26	RS2 PERFIL C-C' SAT TOT
	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016	
INTERPRET 9.016	TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

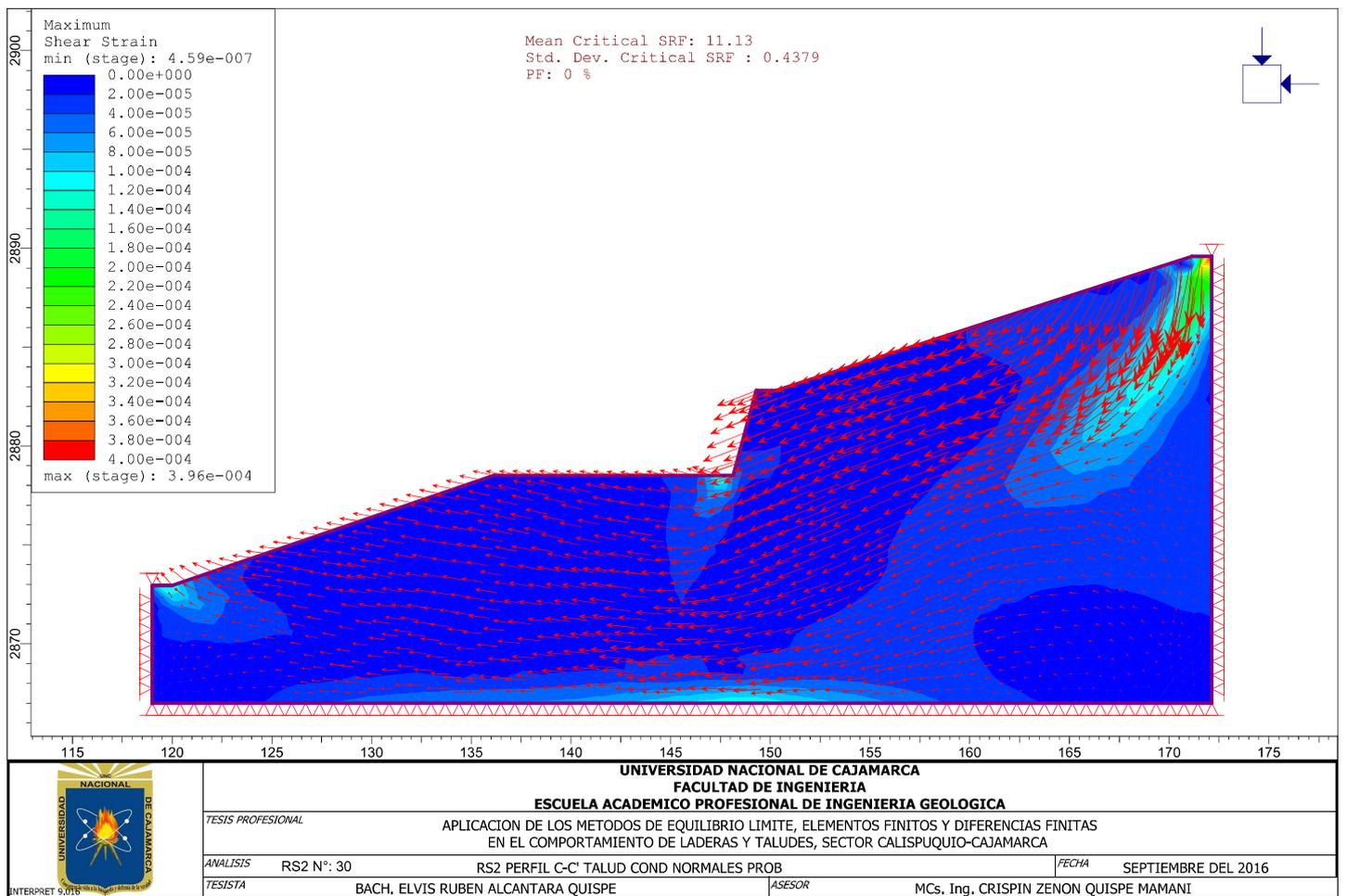
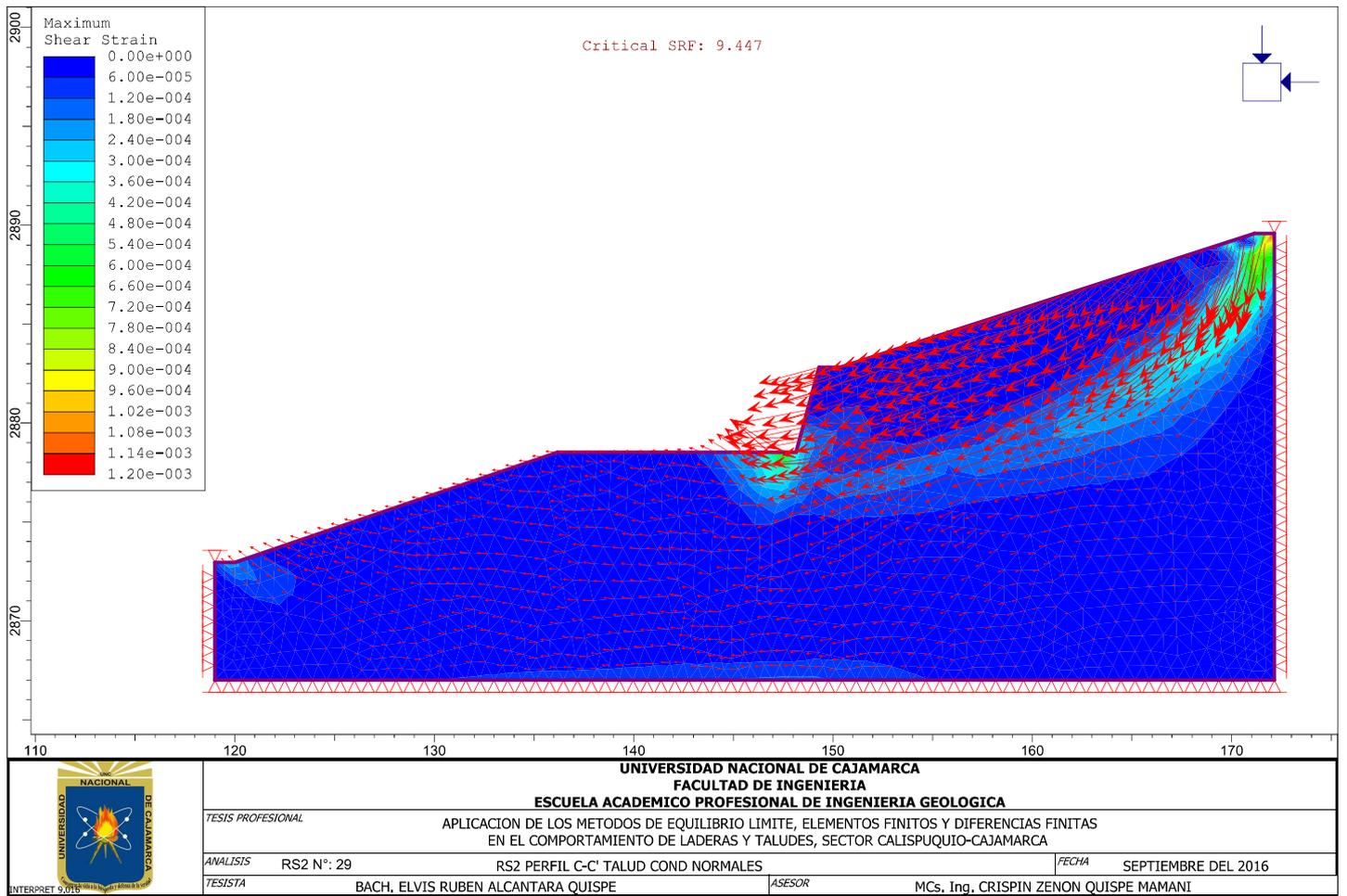
Critical SRF: 0.696

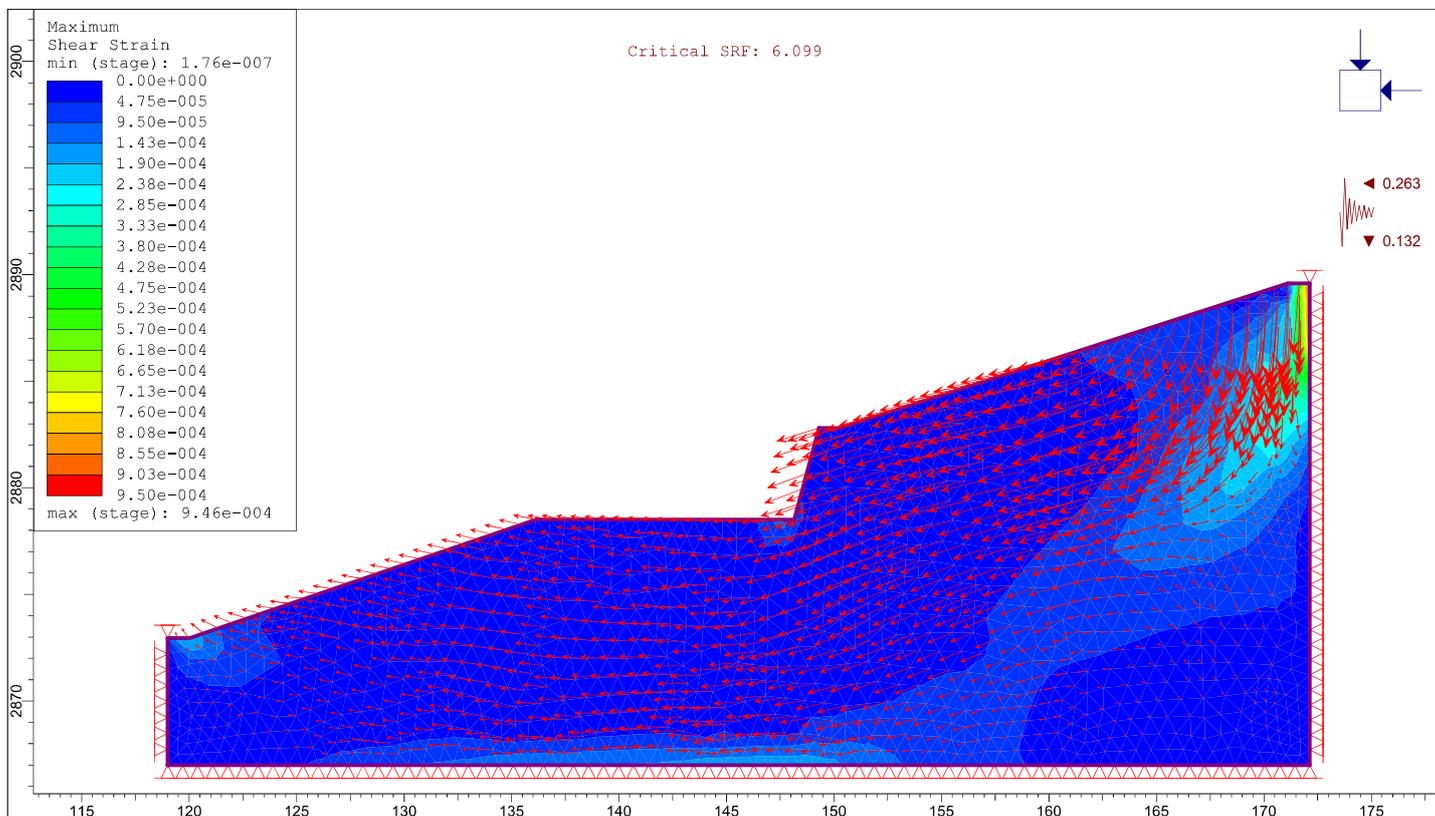


	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISIS	RS2 N°: 27	RS2 PERFIL C-C' SIS MAX Y SAT TOT	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

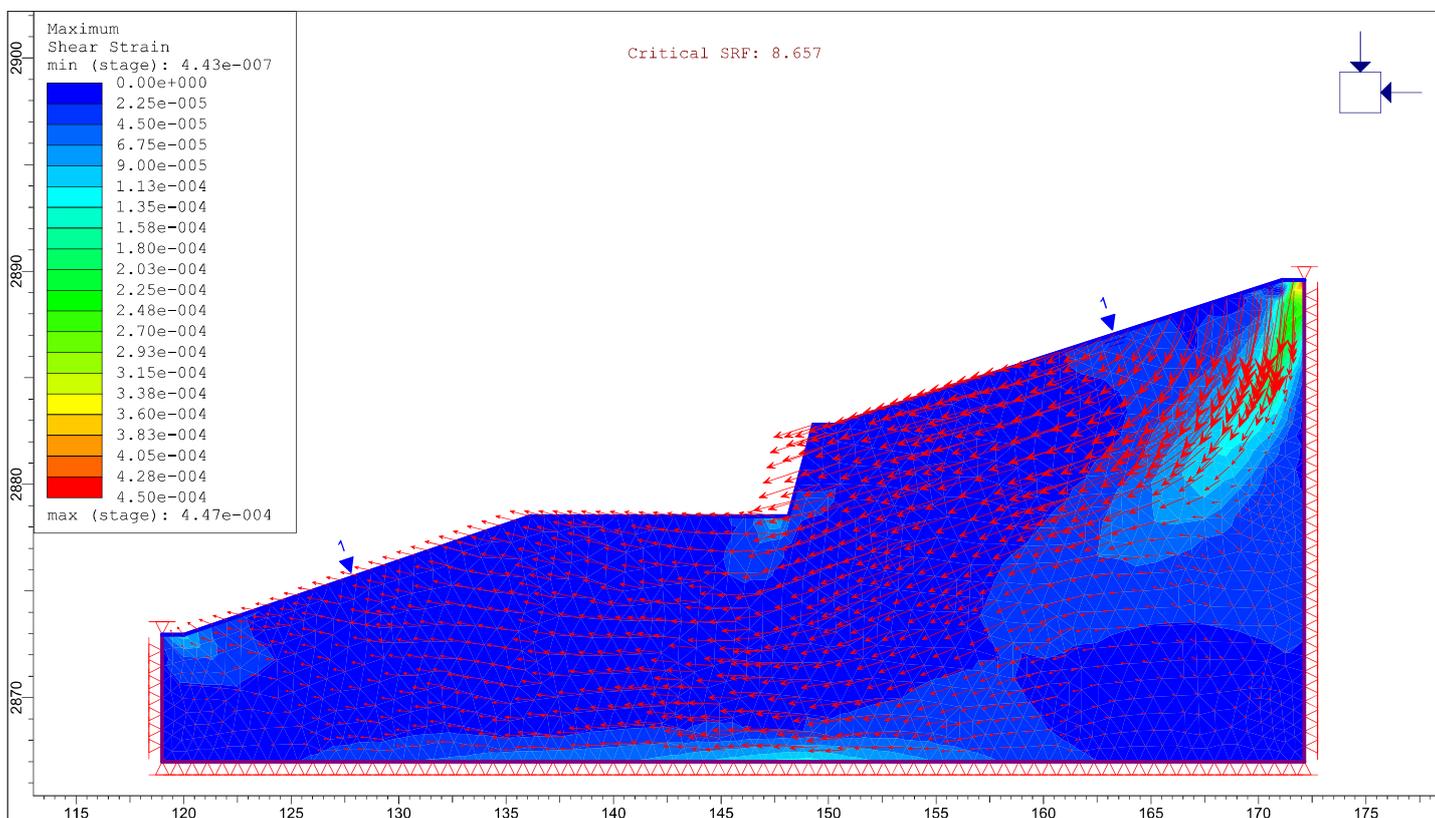


	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISIS	RS2 N°: 28	RS2 PERFIL C-C' TALUD	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

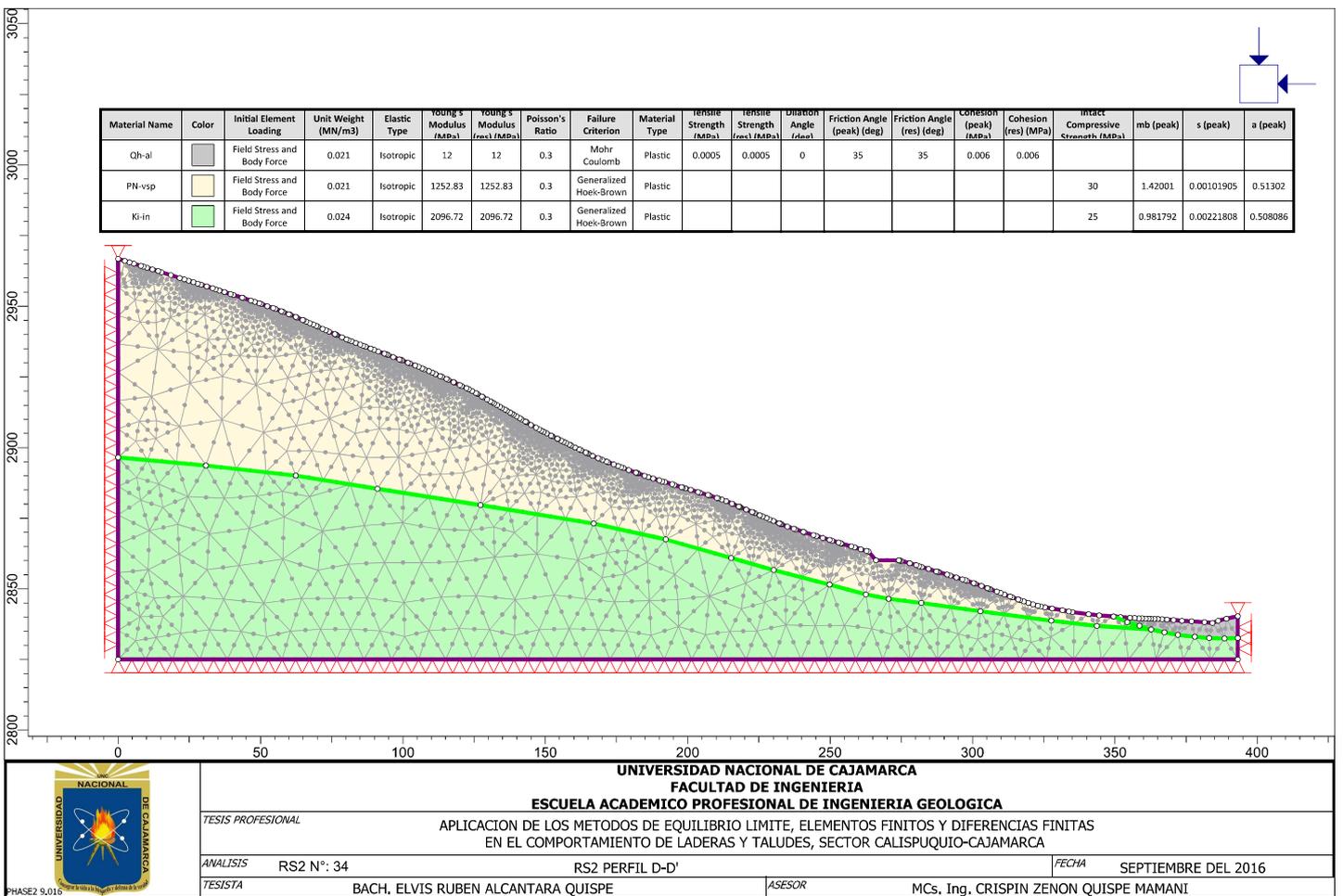
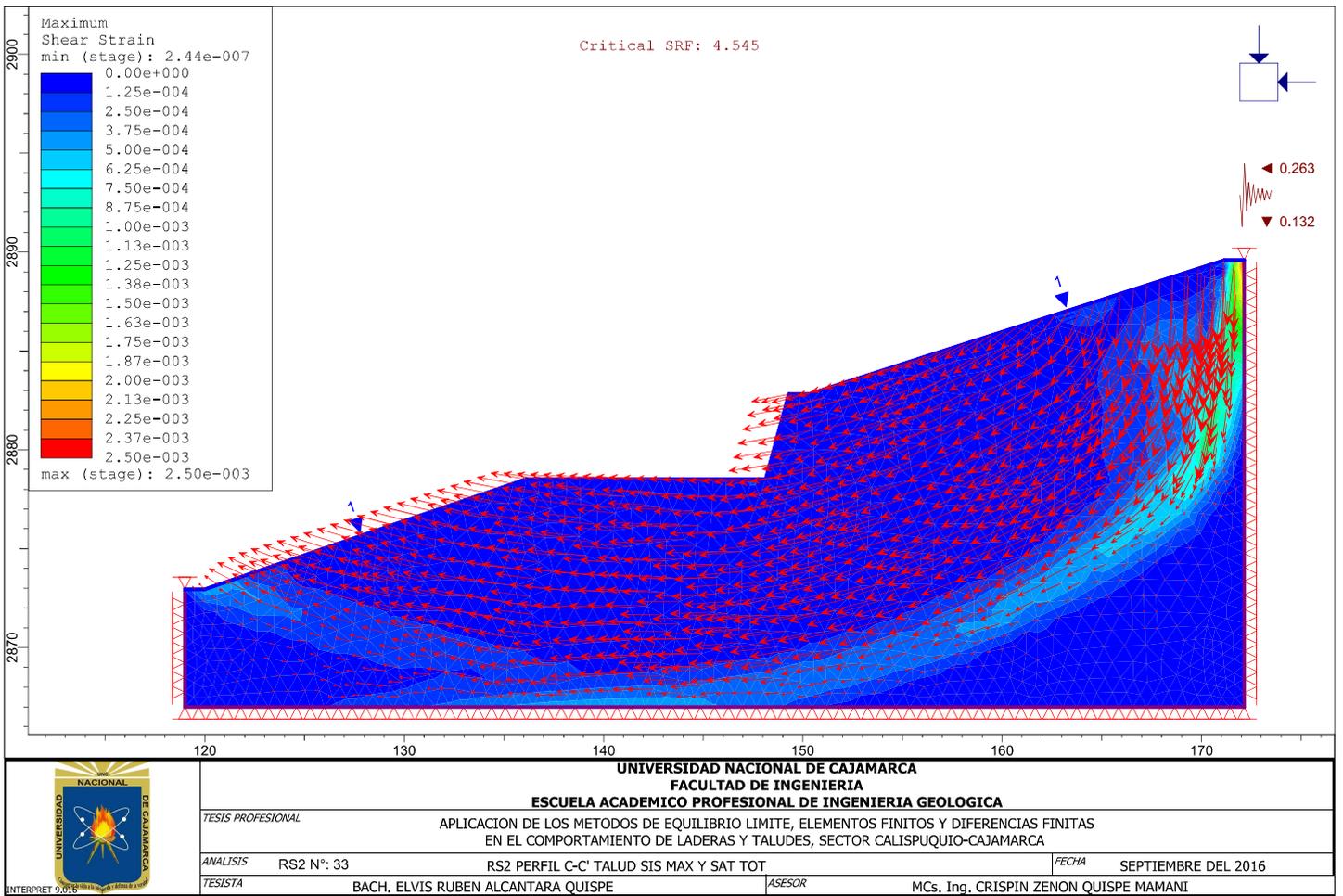




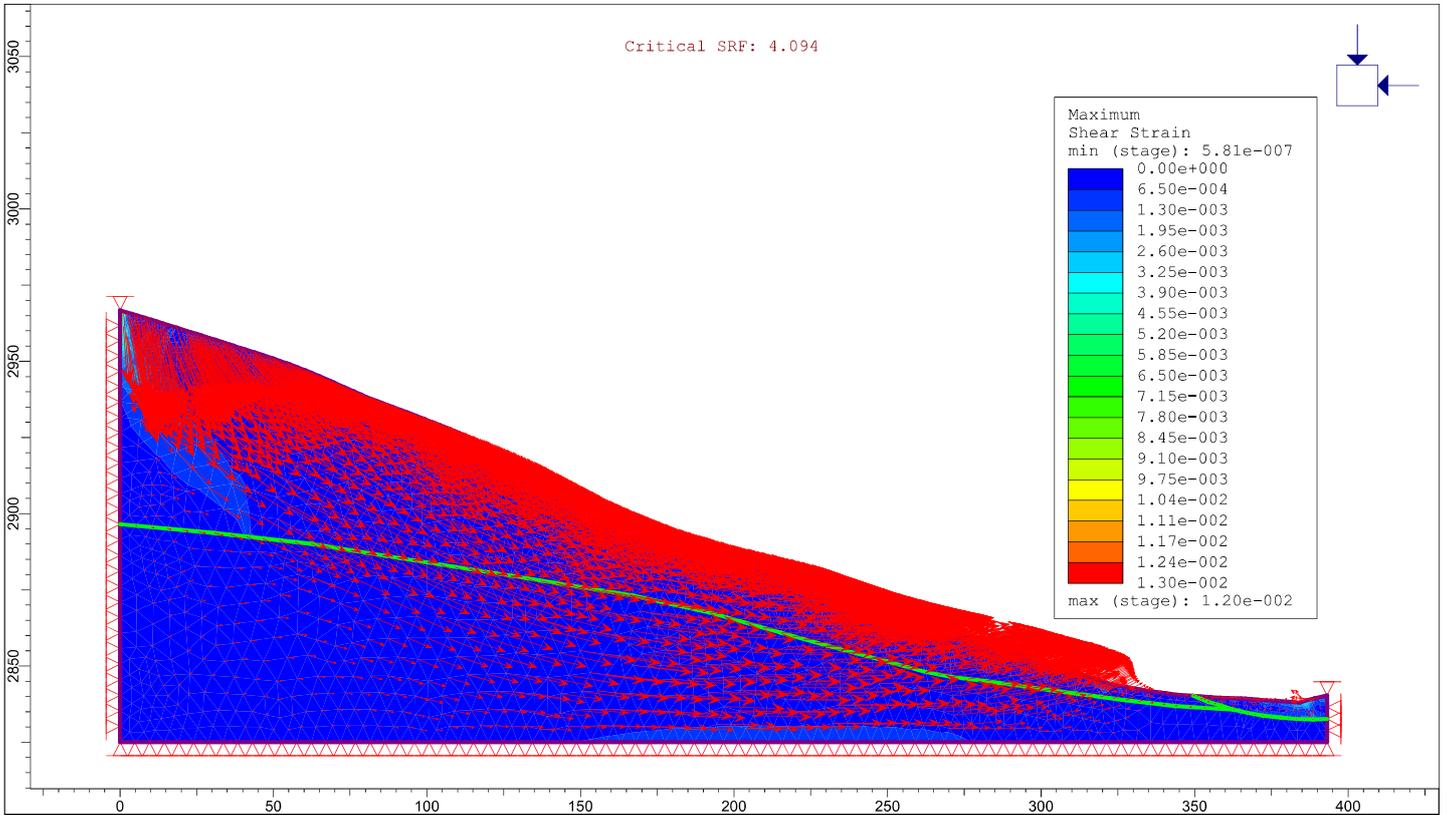
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
	ANALISTA	RS2 N°: 31	RS2 PERFIL C-C' TALUD SIS MAX
	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016	
INTERPRET 9.016	TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	TESIS PROFESIONAL APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
	ANALISTA	RS2 N°: 32	RS2 PERFIL C-C' TALUD SAT TOT
	FECHA	SEPTIEMBRE DEL 2016	
INTERPRET 9.016	TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE	ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

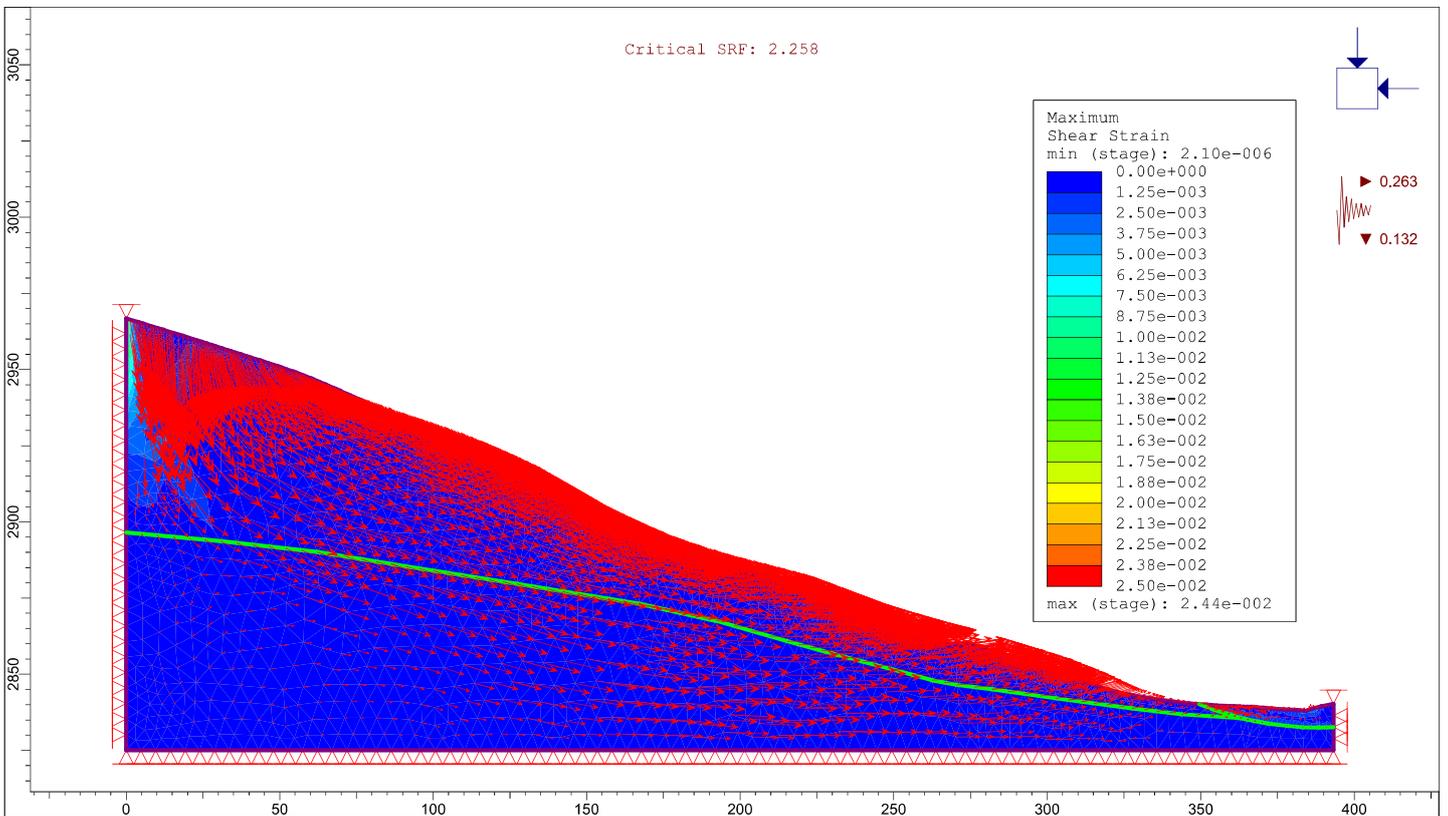


Critical SRF: 4.094



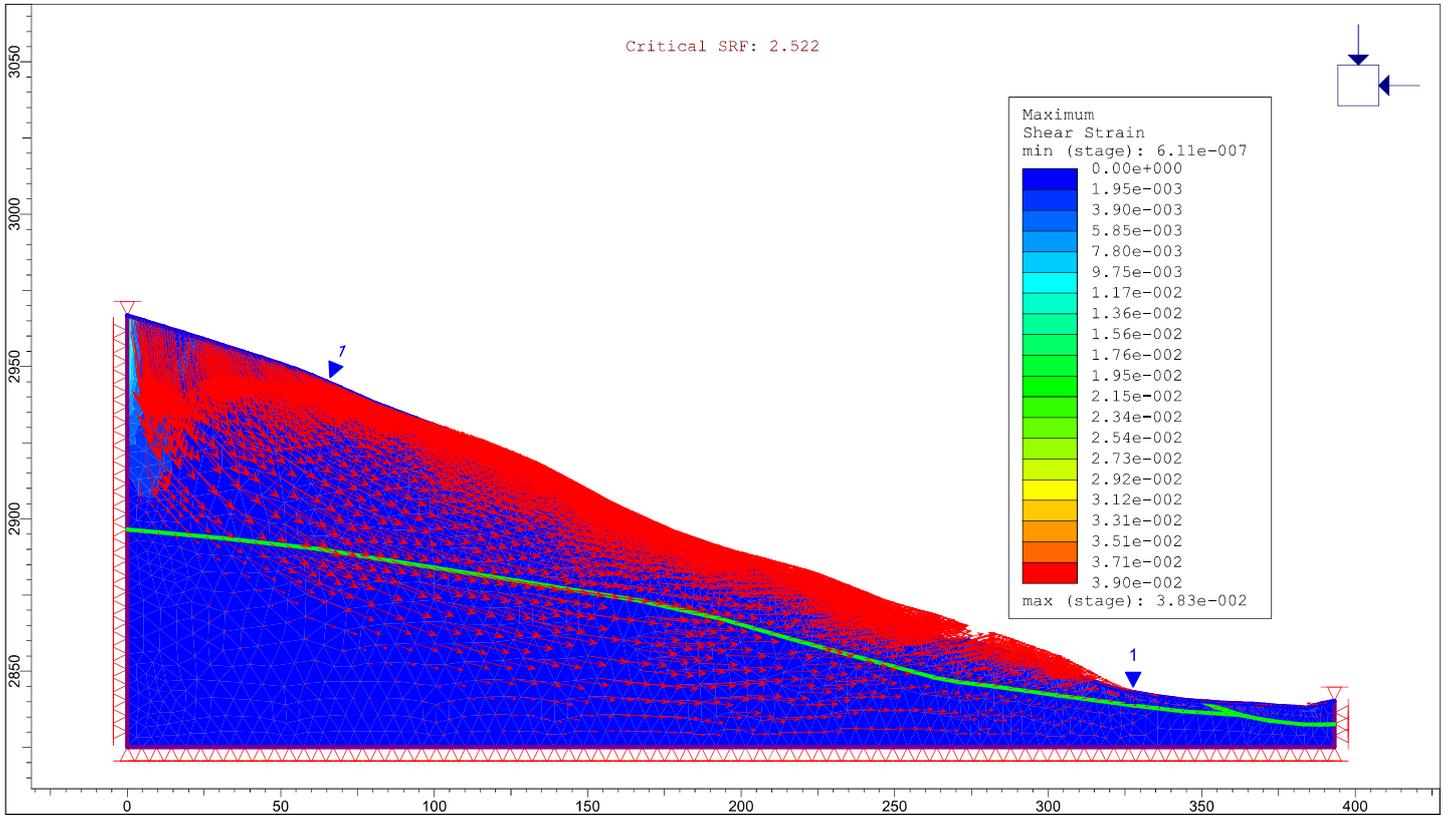
<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISTA	RS2 N°: 35	RS2 PERFIL D-D' COND NORMALES	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

Critical SRF: 2.258



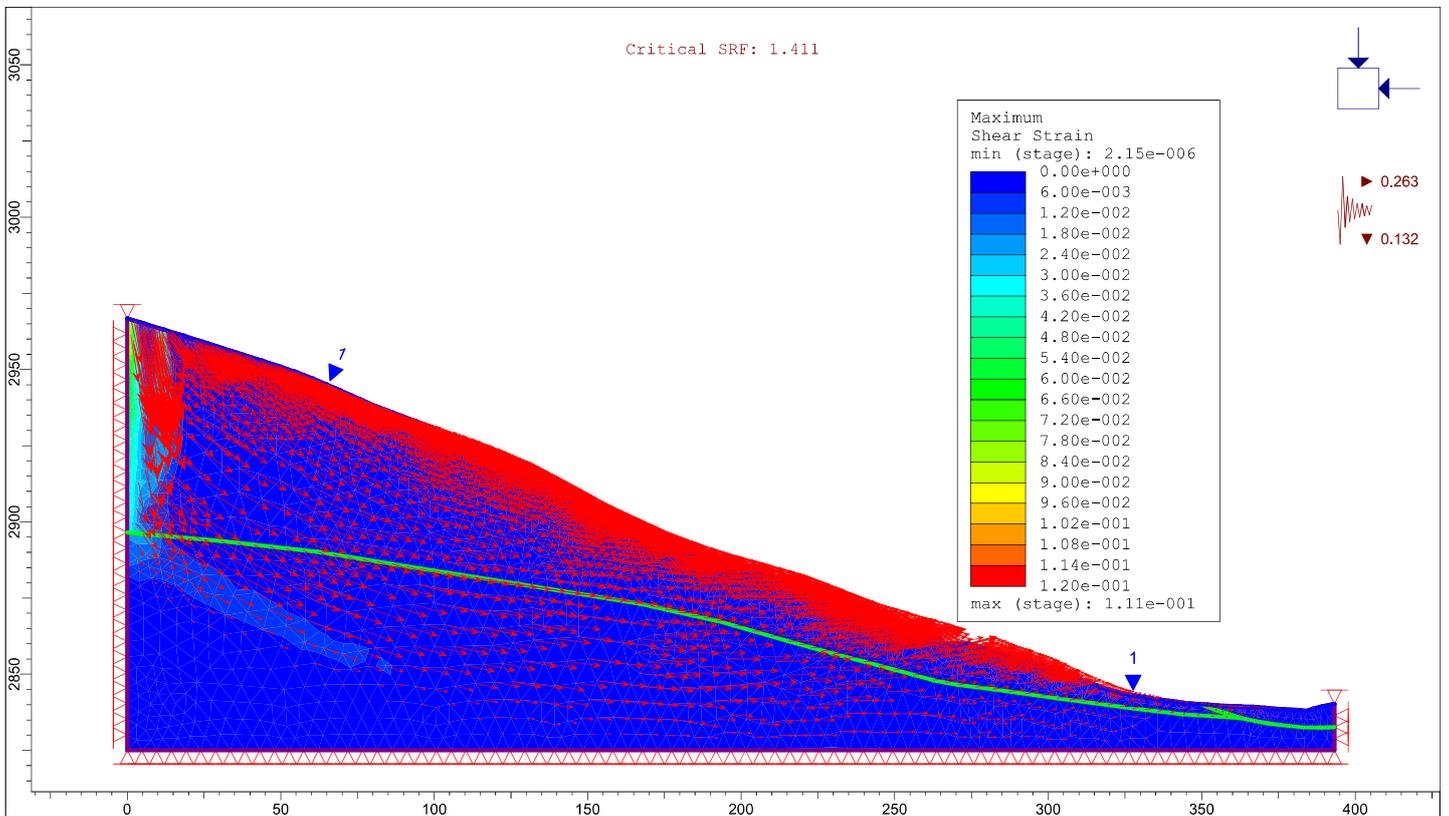
<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>			
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>			
<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>			
APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA			
ANALISTA	RS2 N°: 36	RS2 PERFIL D-D' SIS MAX	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

Critical SRF: 2.522

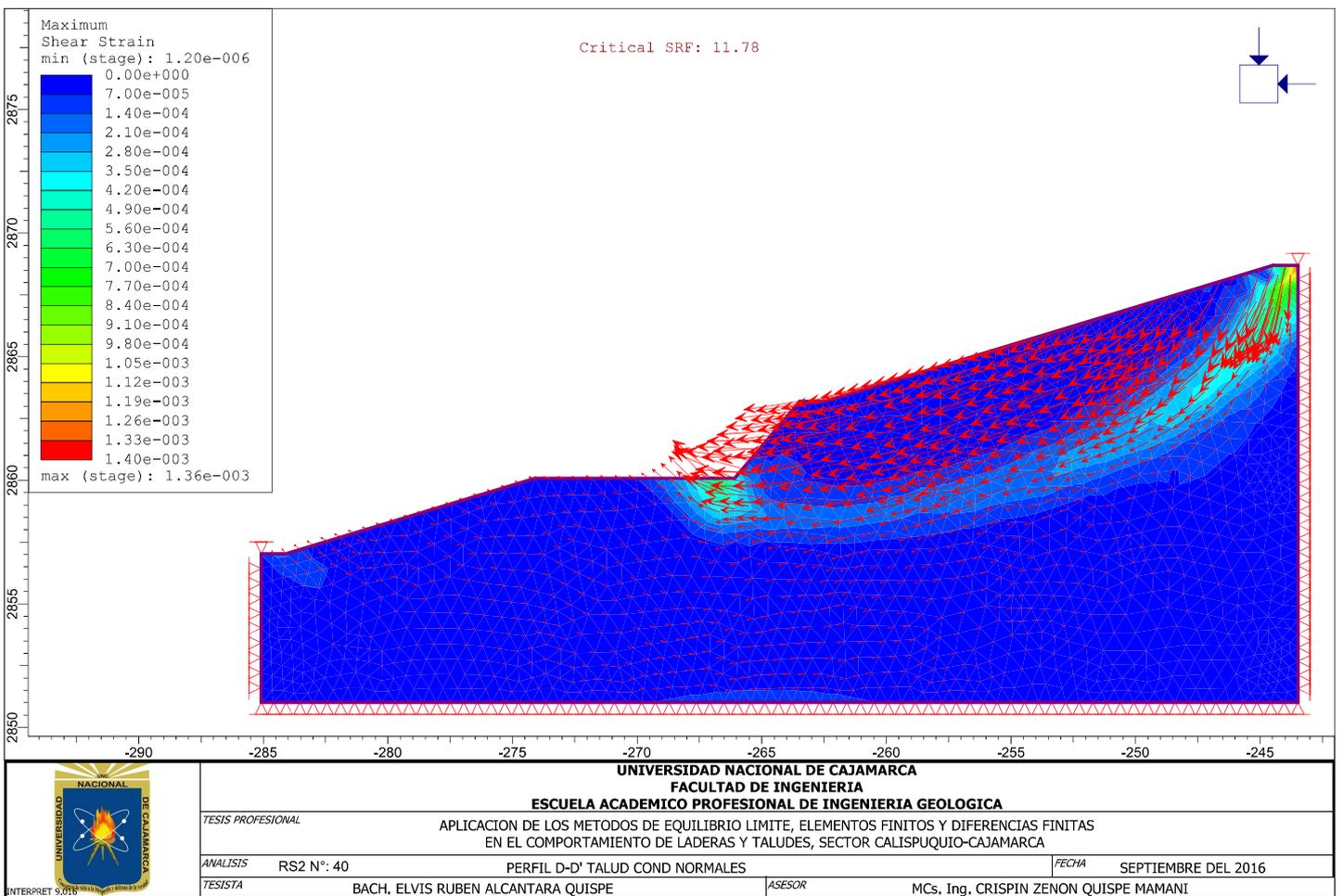
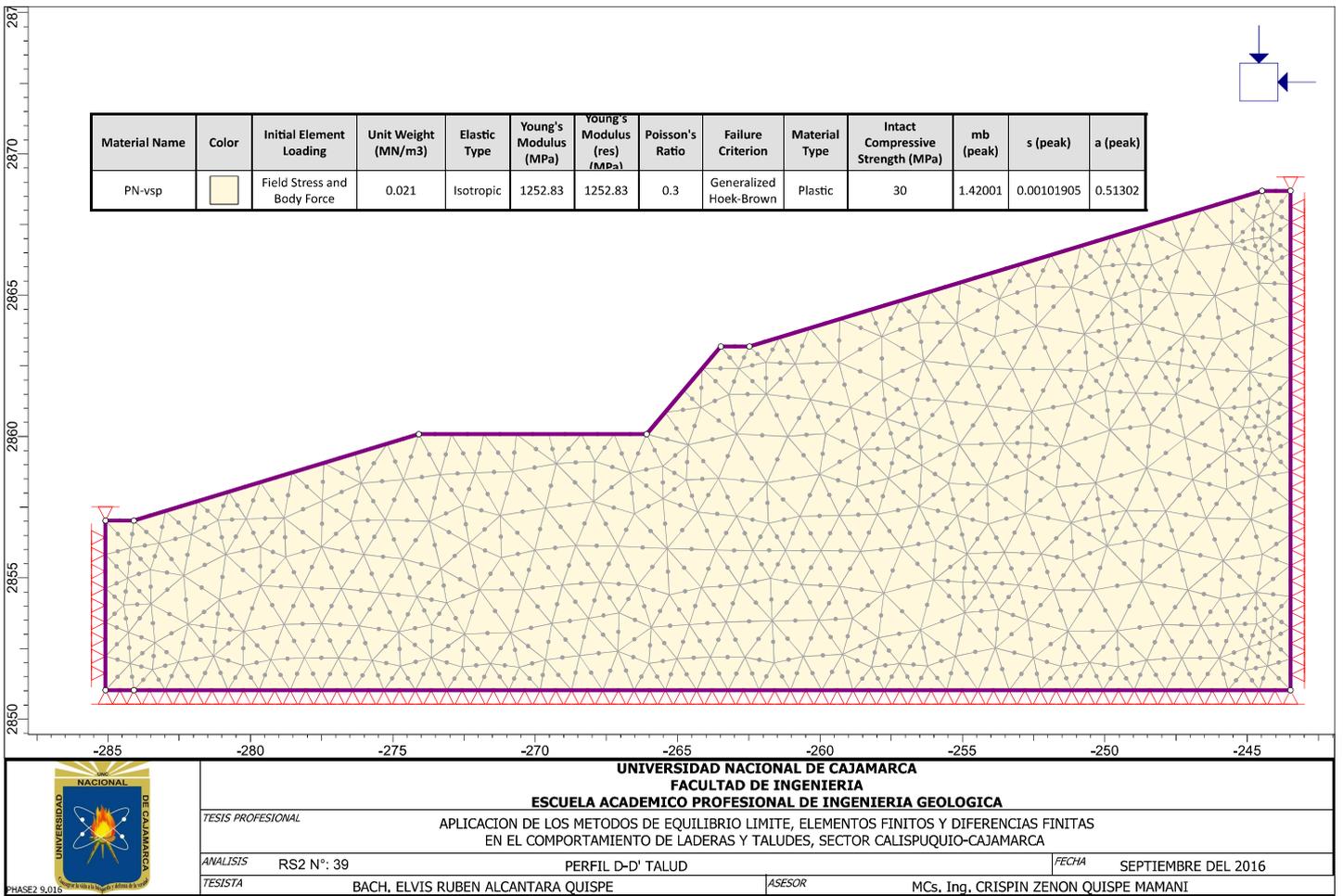


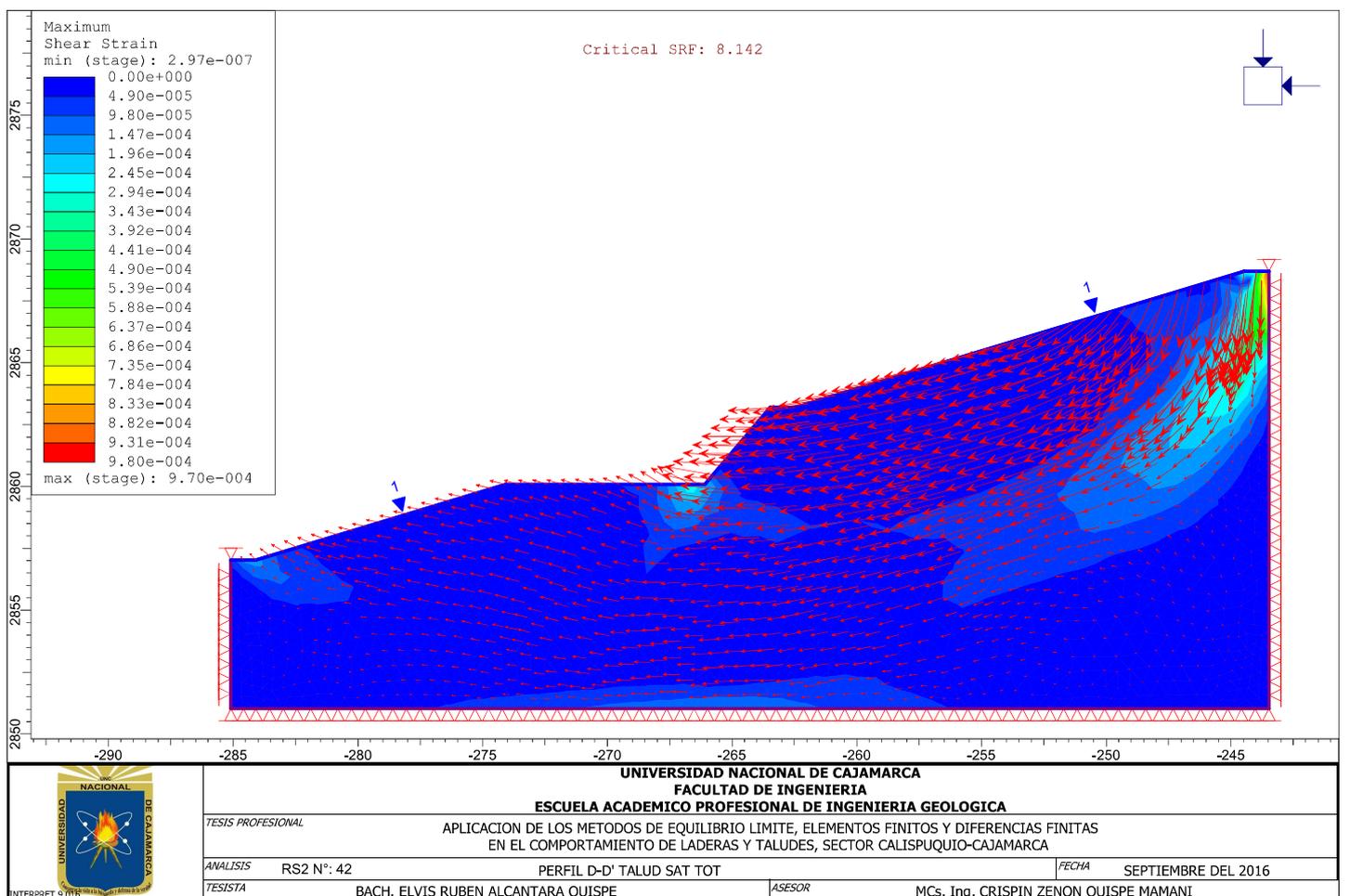
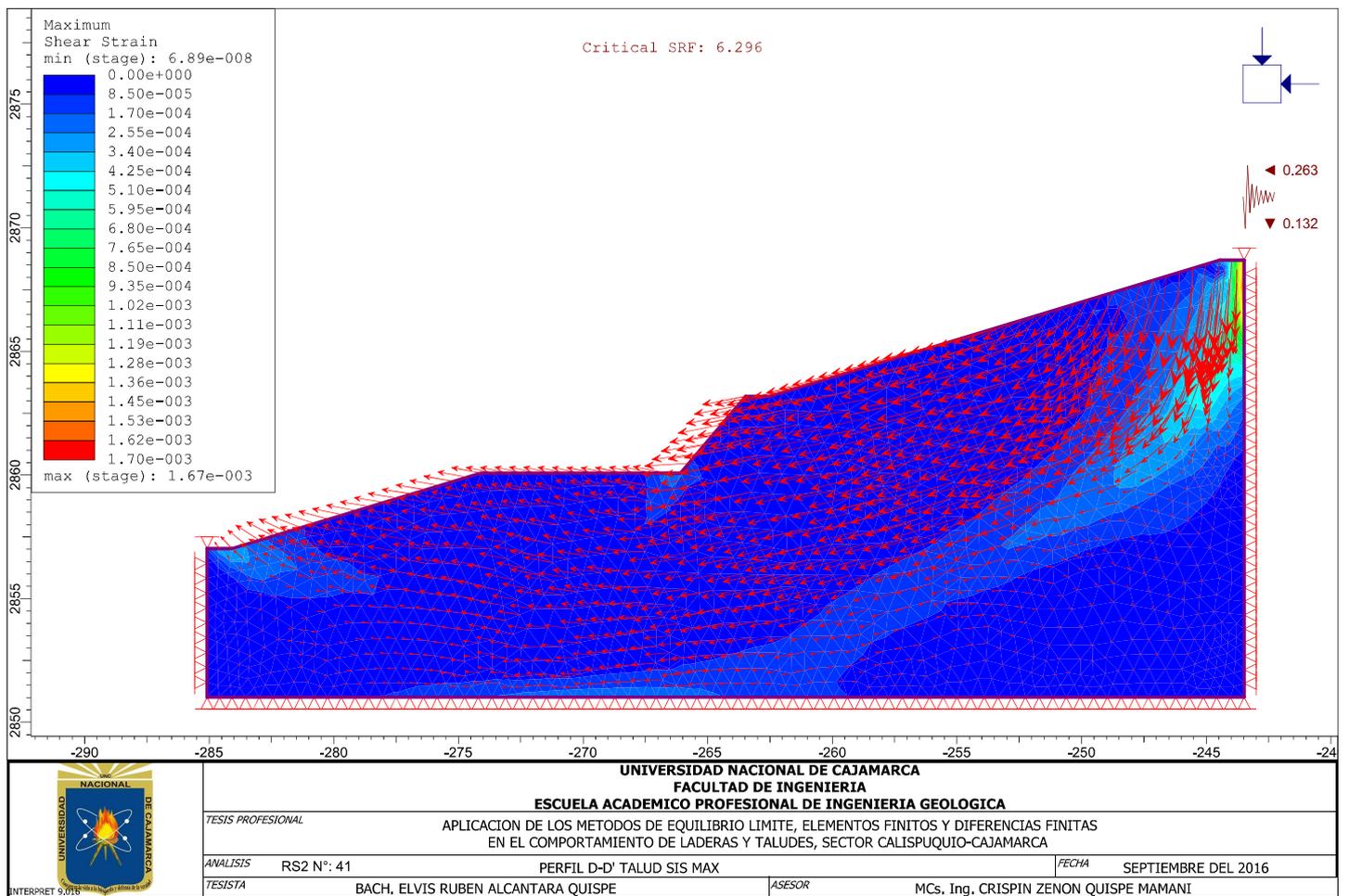
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISIS	RS2 N°: 37	RS2 PERFIL D-D' SAT TOT	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

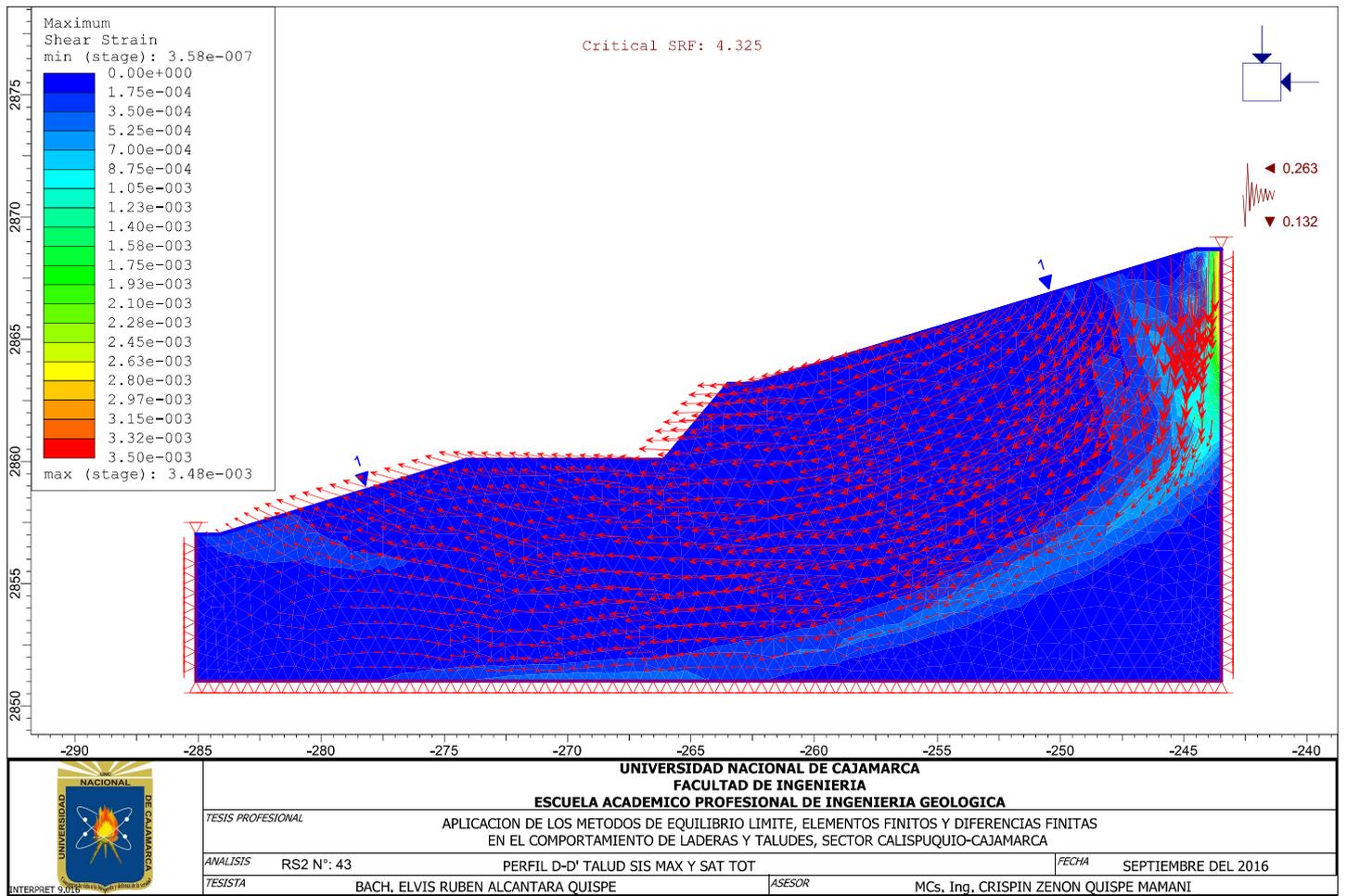
Critical SRF: 1.411

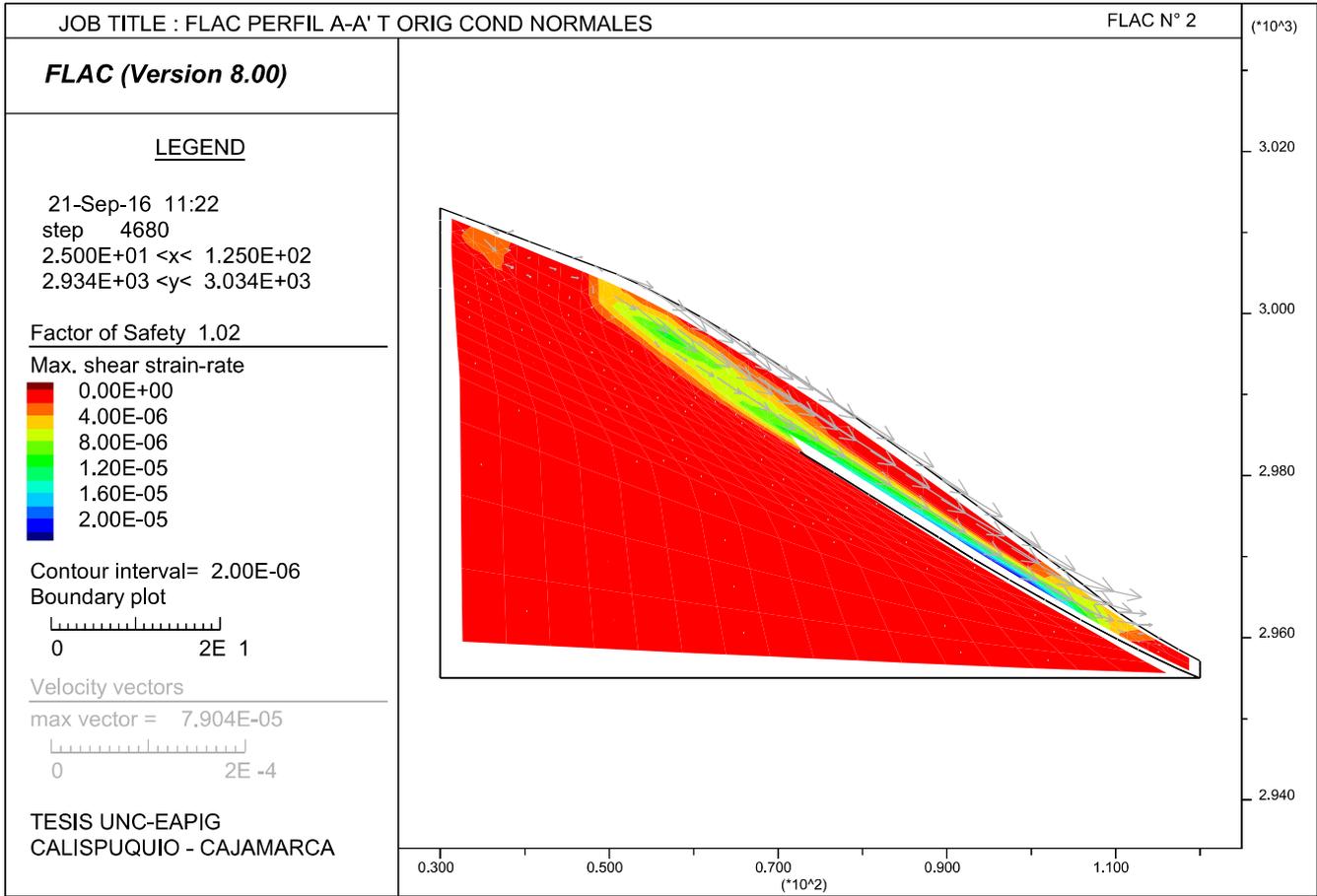
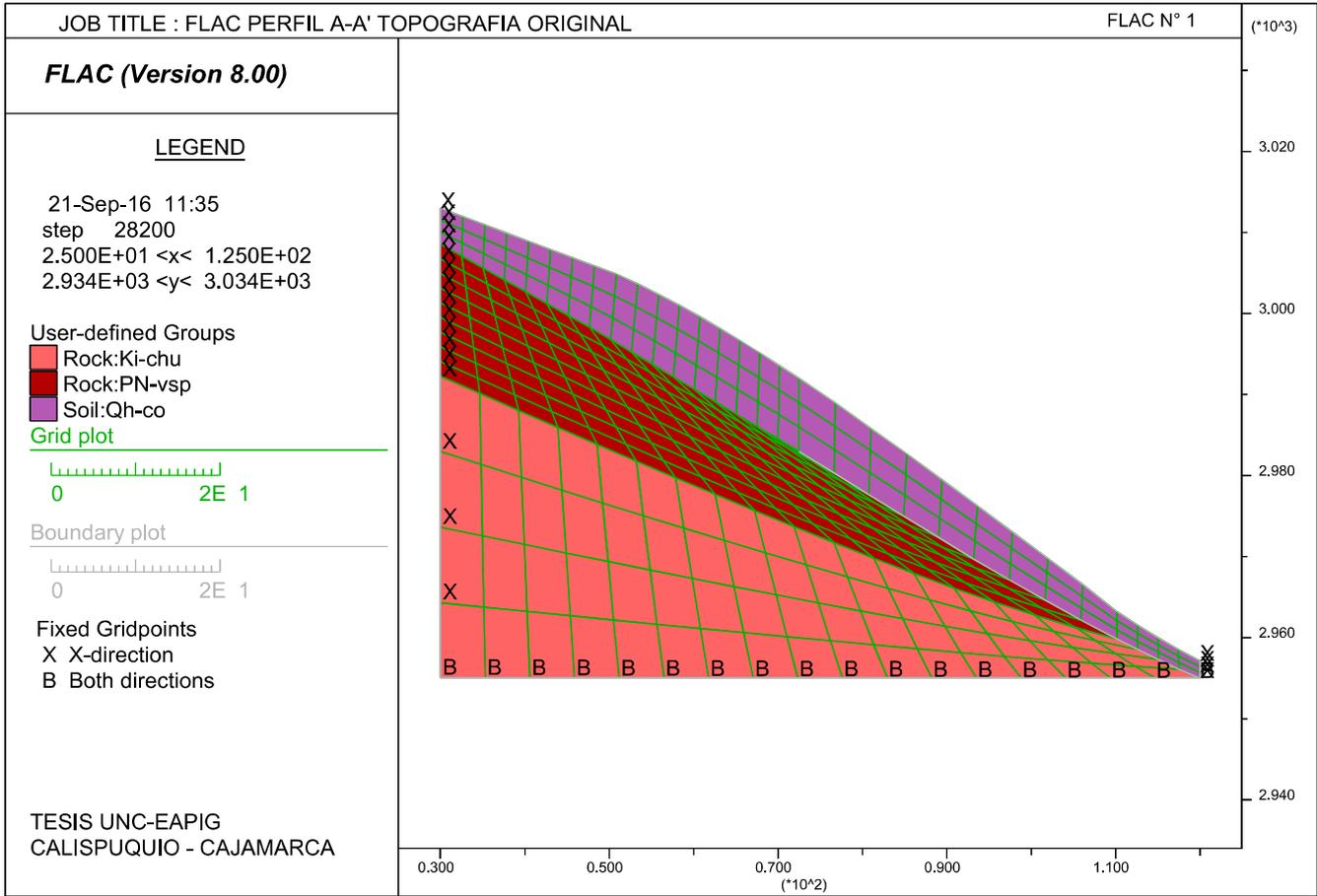


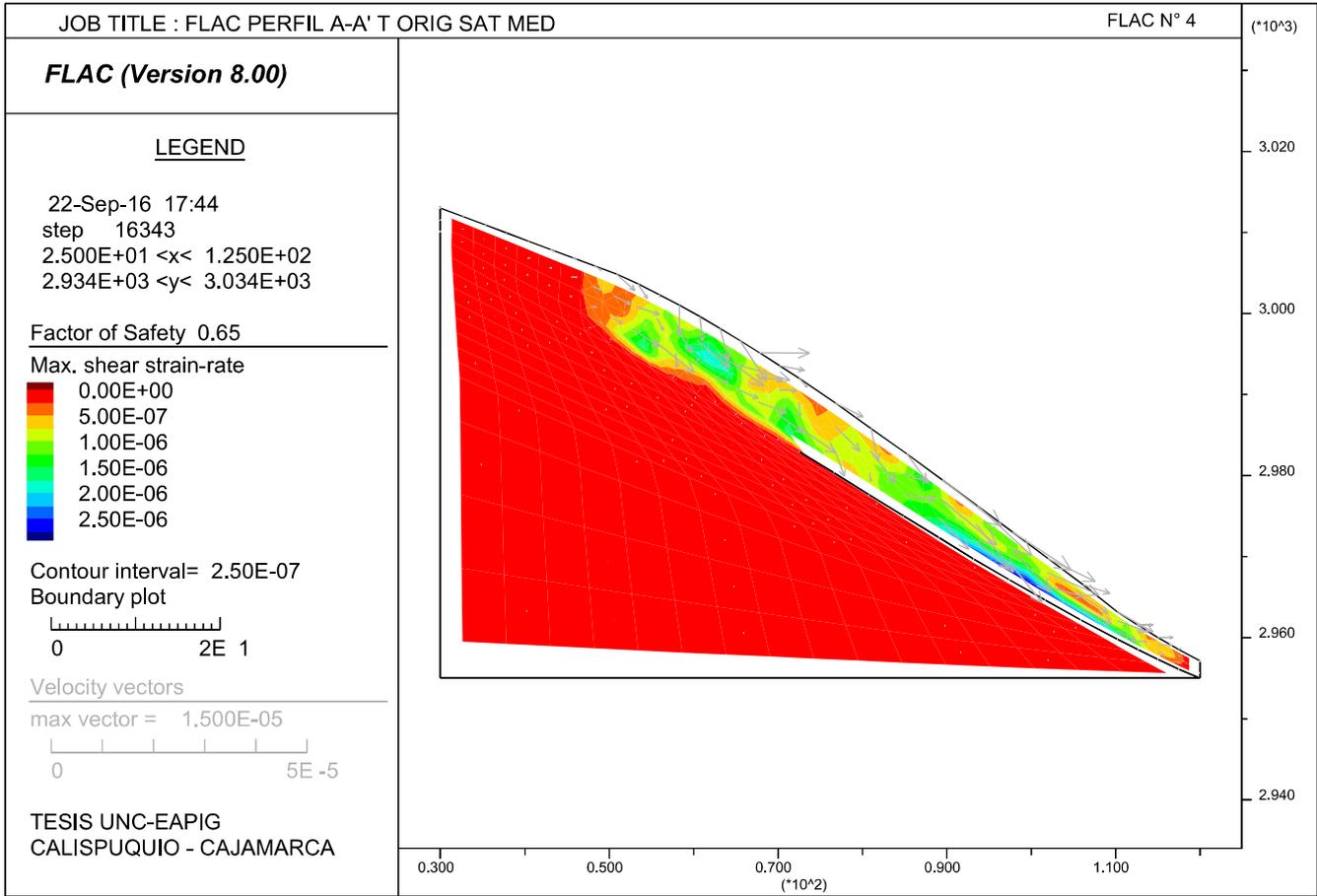
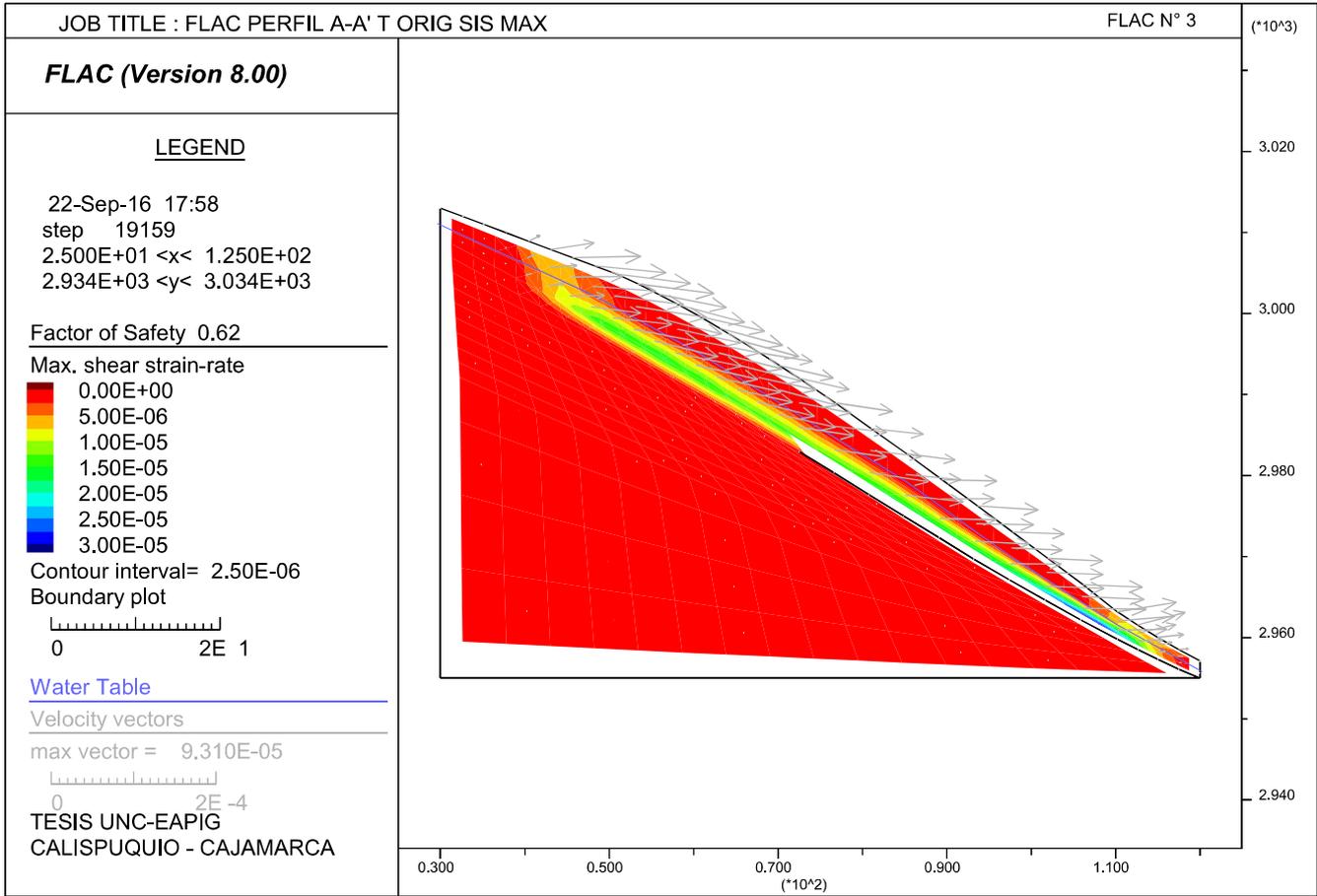
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA</b>		
	APLICACION DE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LIMITE, ELEMENTOS FINITOS Y DIFERENCIAS FINITAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LADERAS Y TALUDES, SECTOR CALISPUQUIO-CAJAMARCA		
ANALISIS	RS2 N°: 38	RS2 PERFIL D-D' SIS MAX Y SAT TOT	FECHA SEPTIEMBRE DEL 2016
TESISTA	BACH. ELVIS RUBEN ALCANTARA QUISPE		ASESOR MCS. Ing. CRISPIN ZENON QUISPE MAMANI

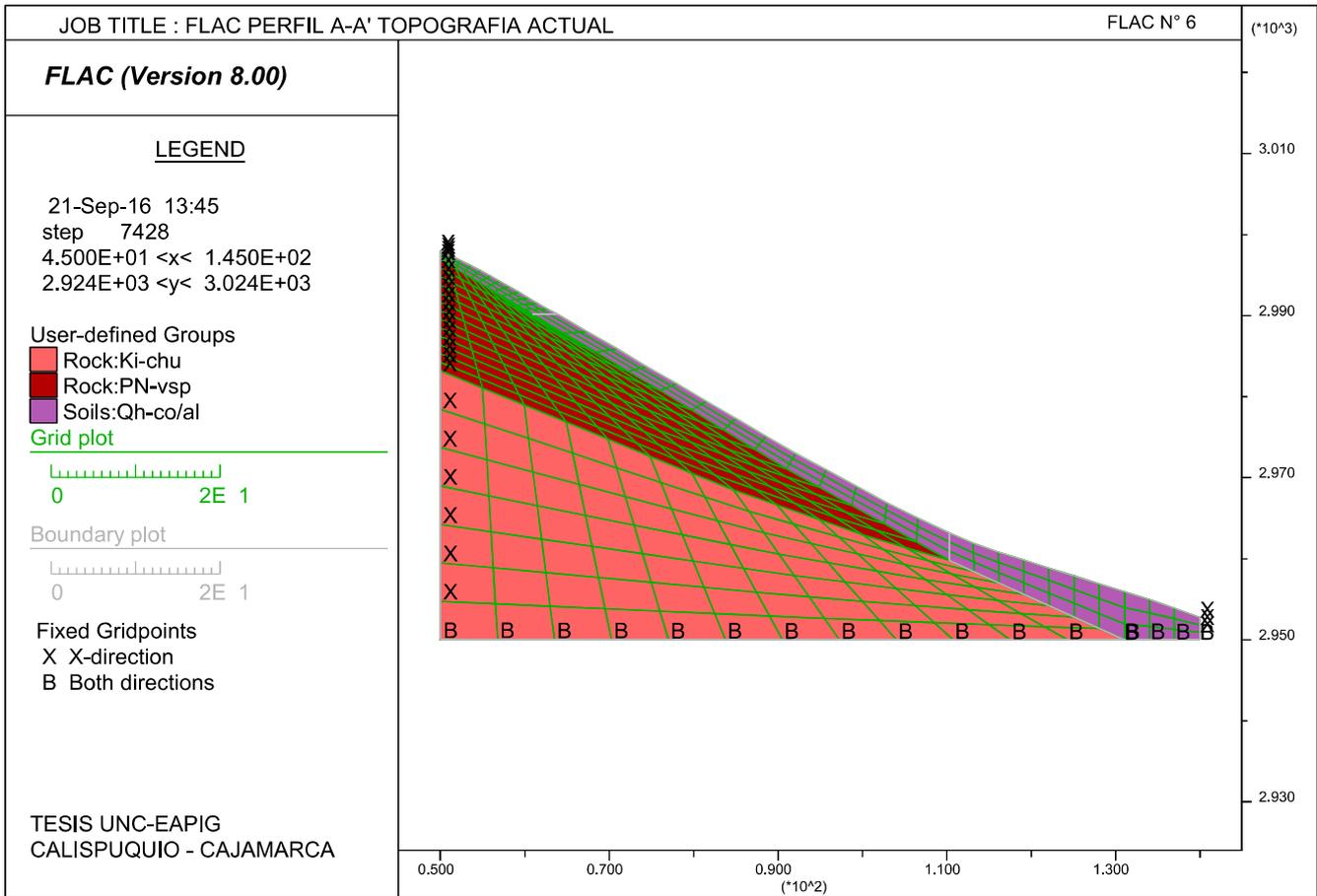
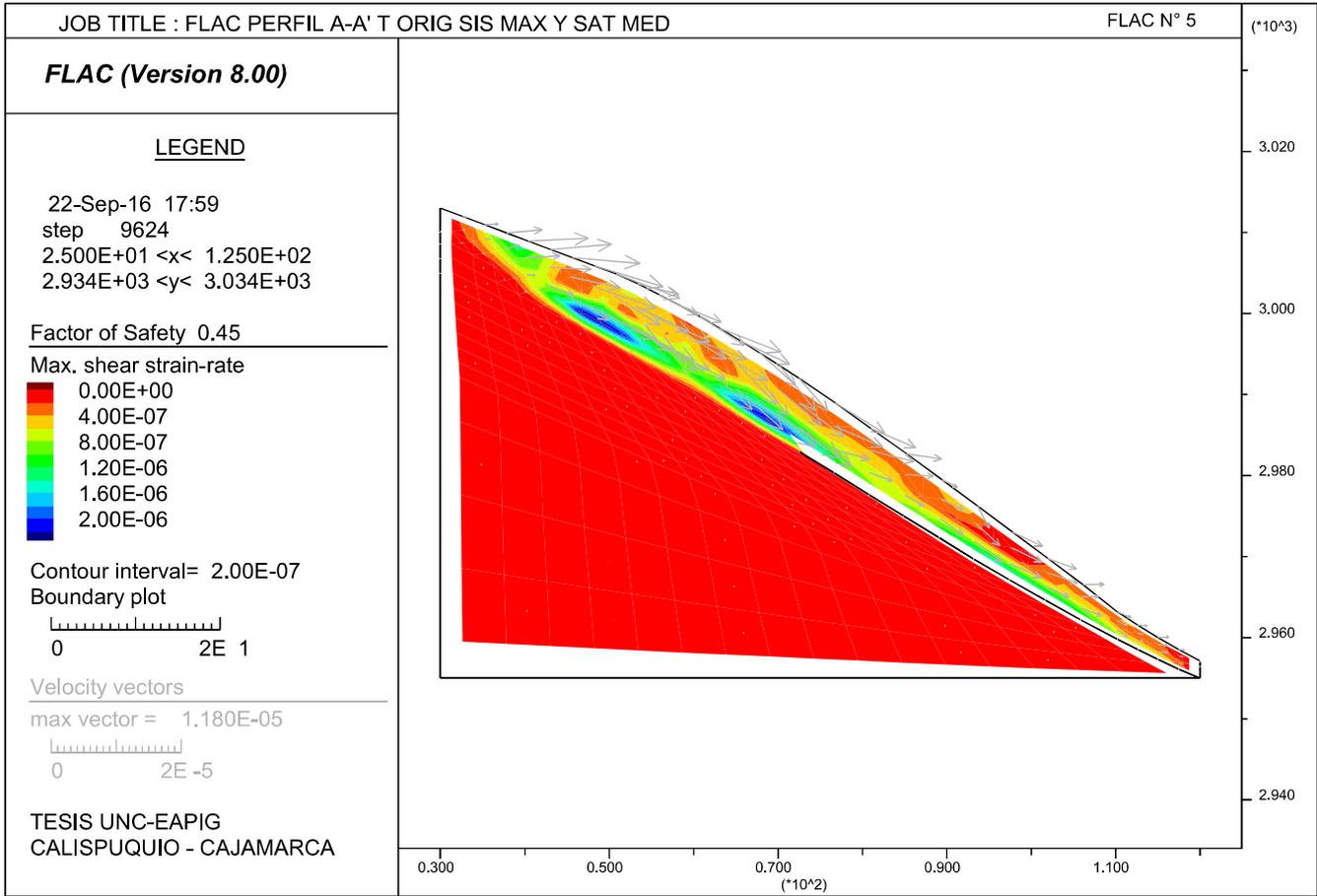


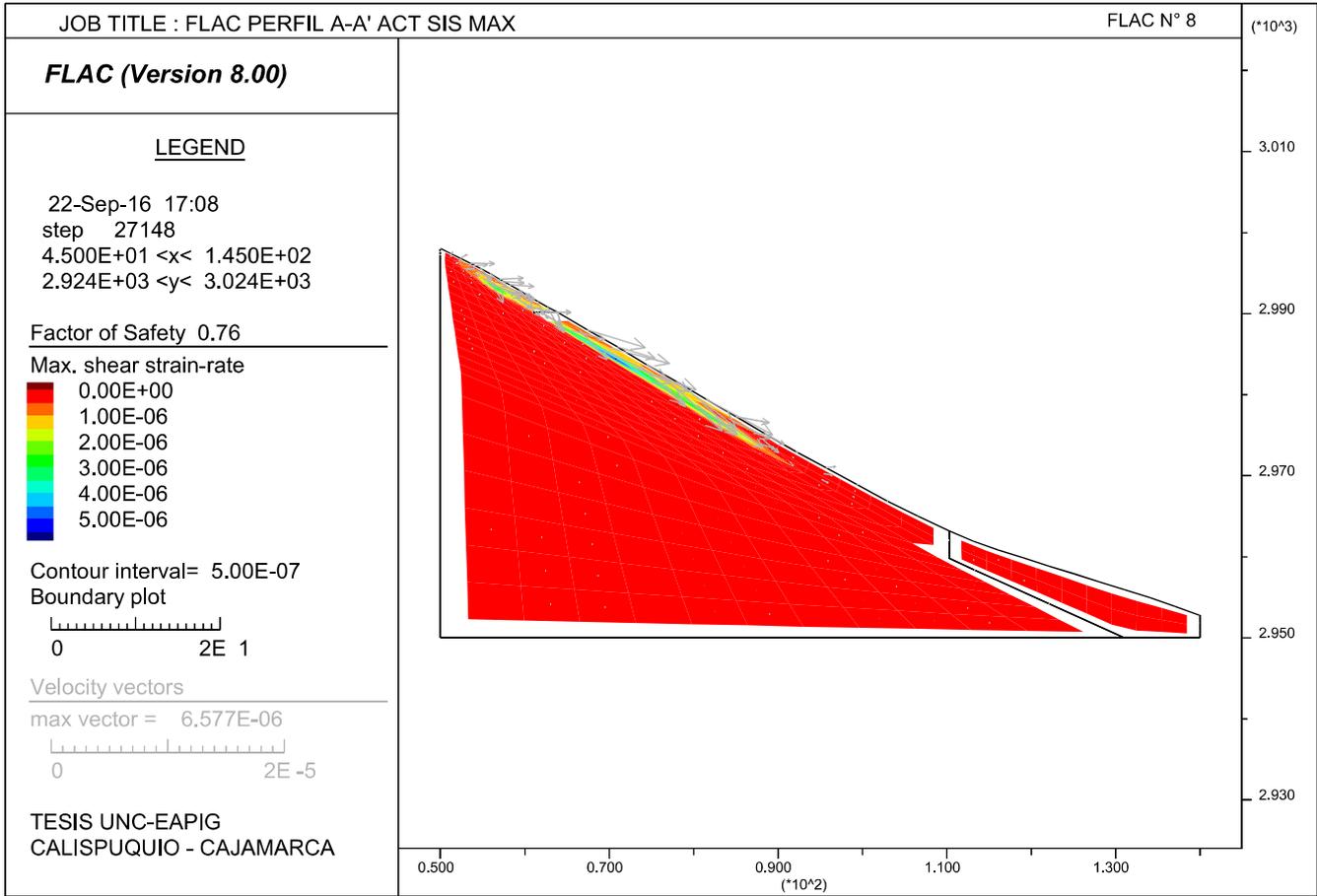
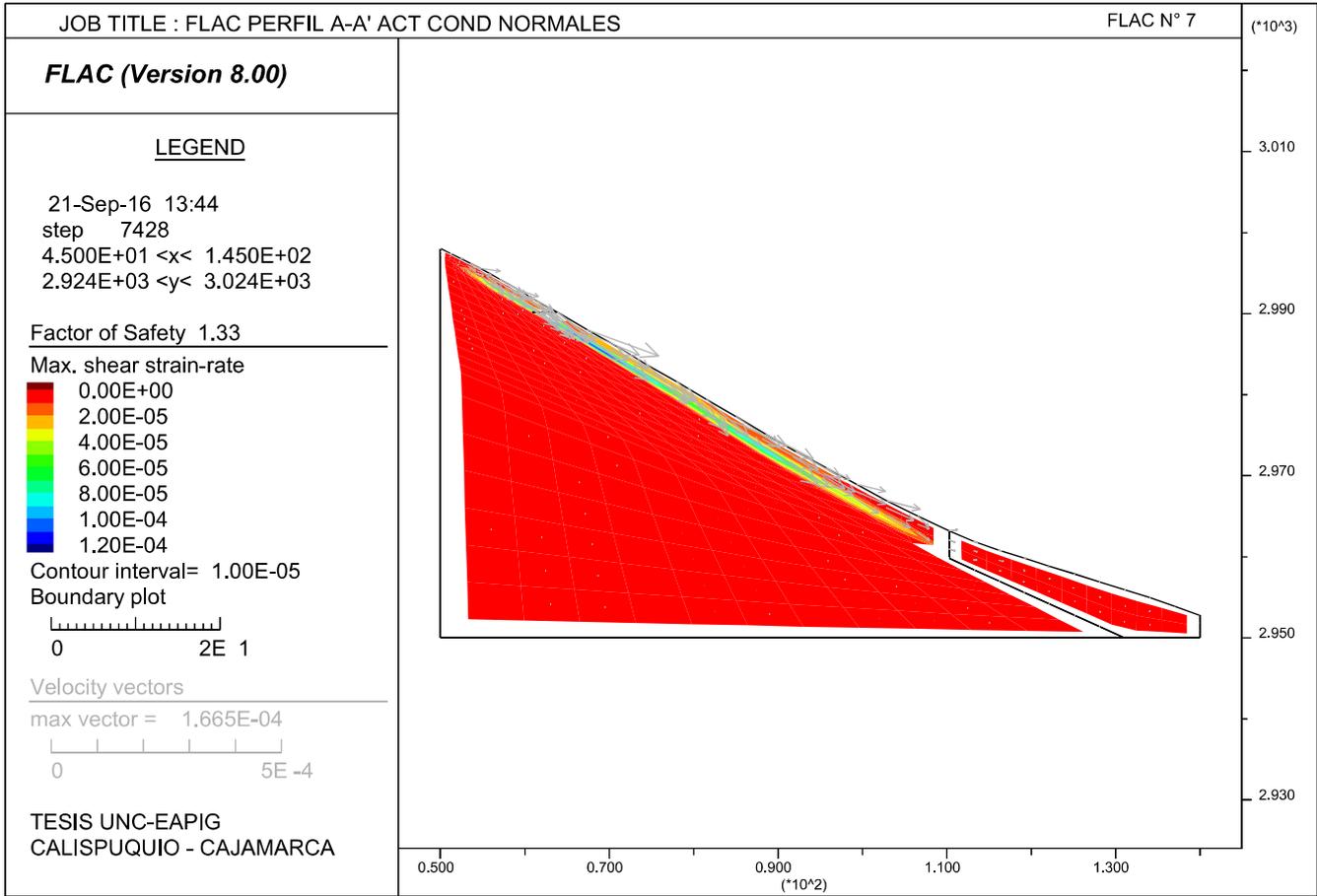


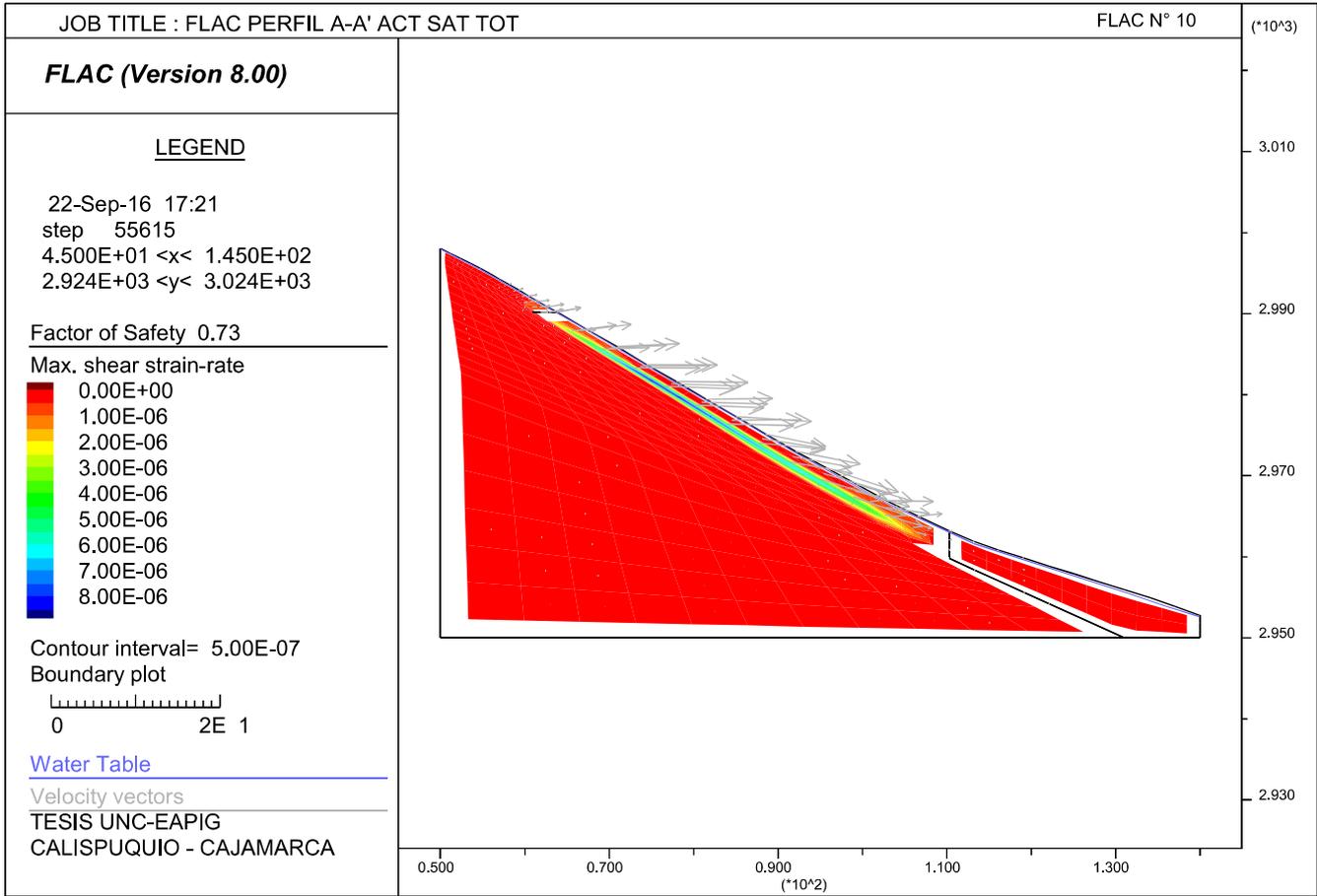
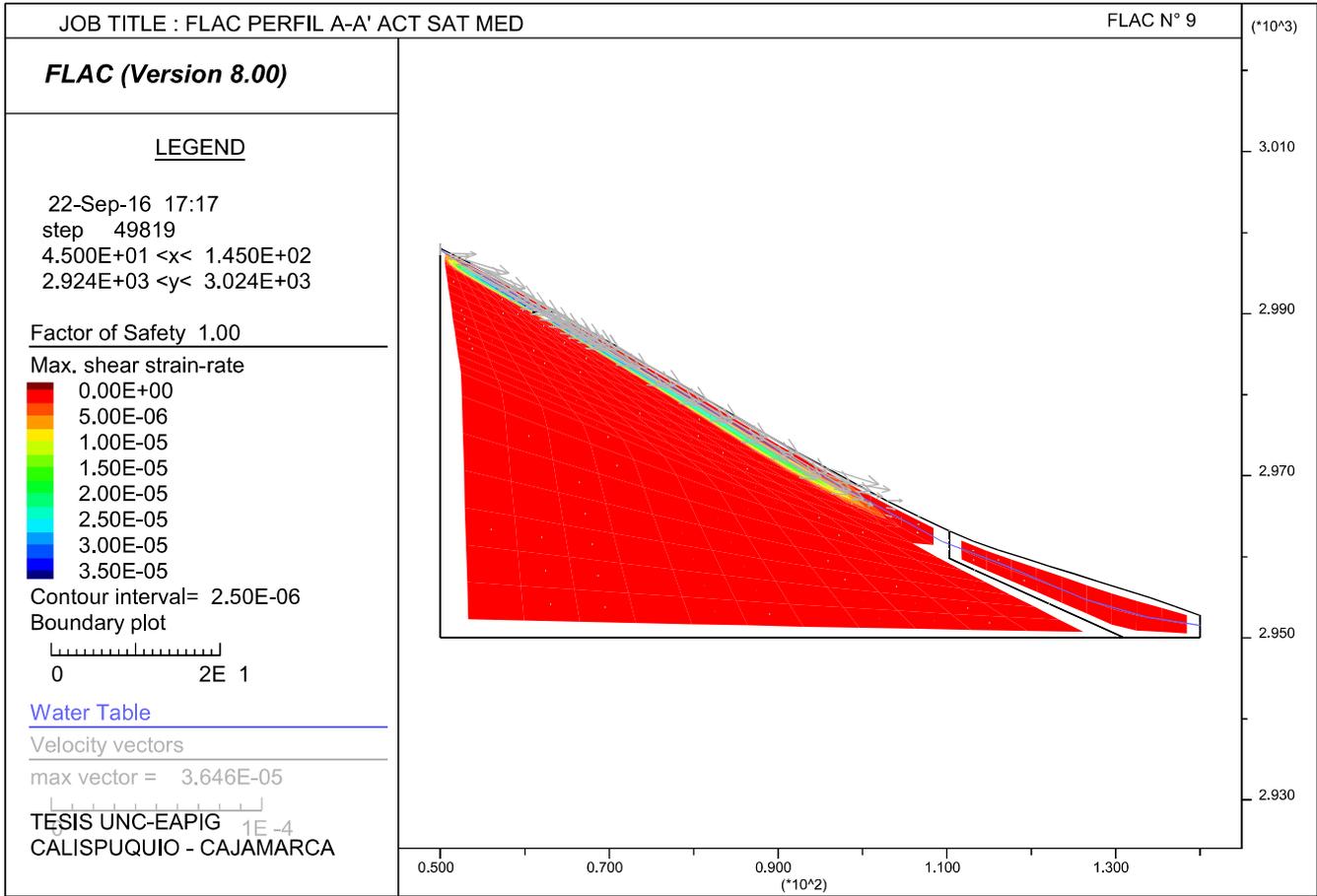


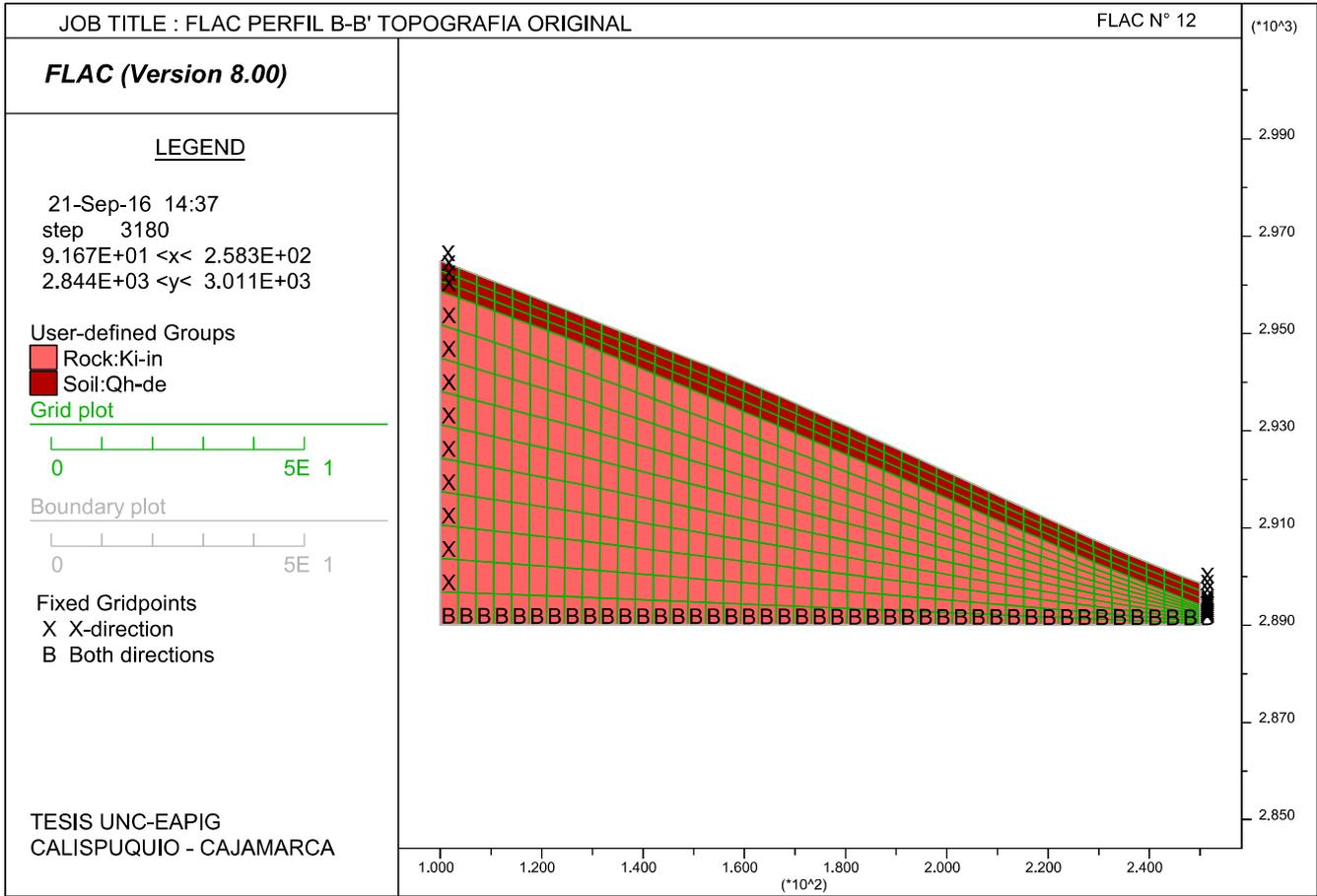
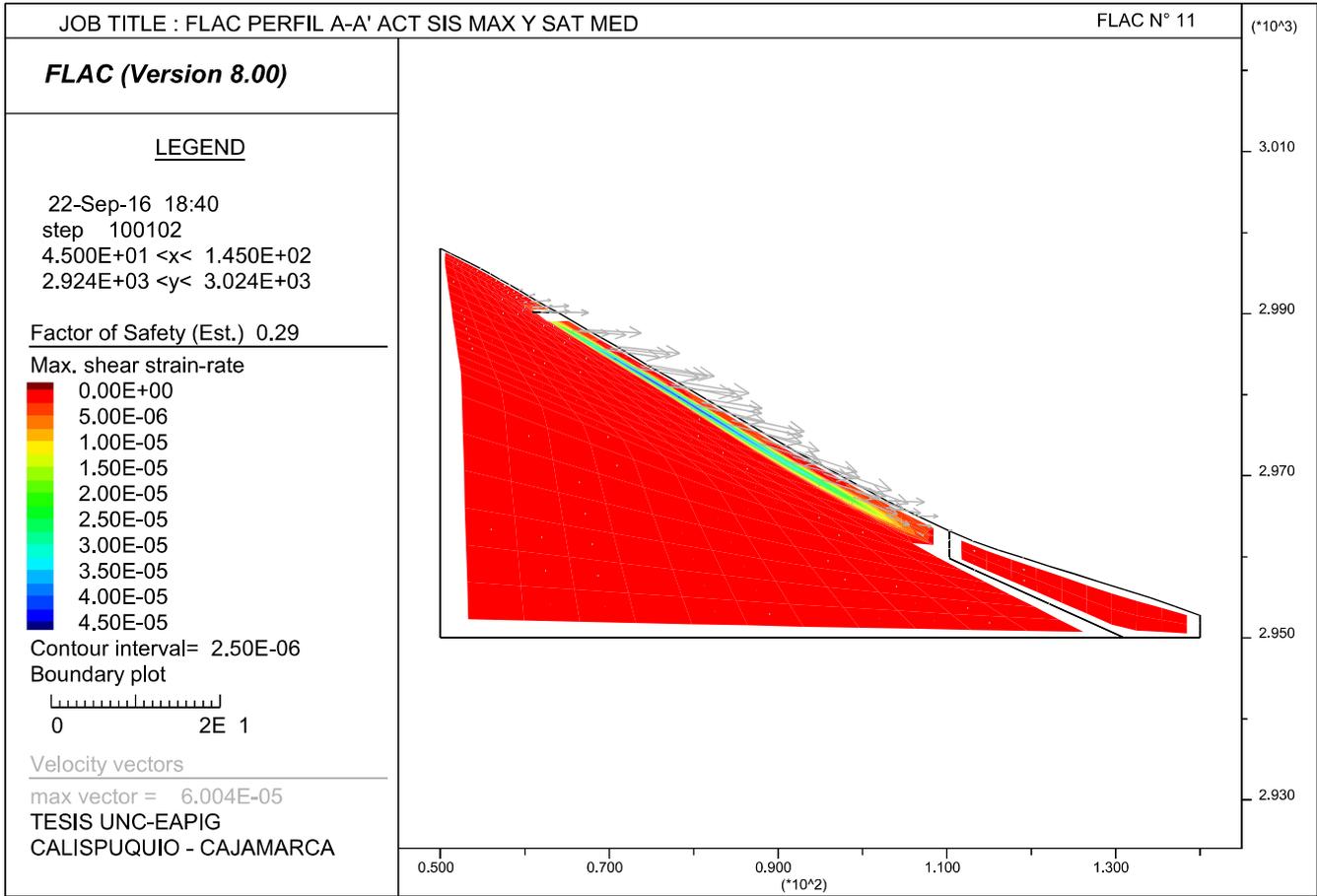


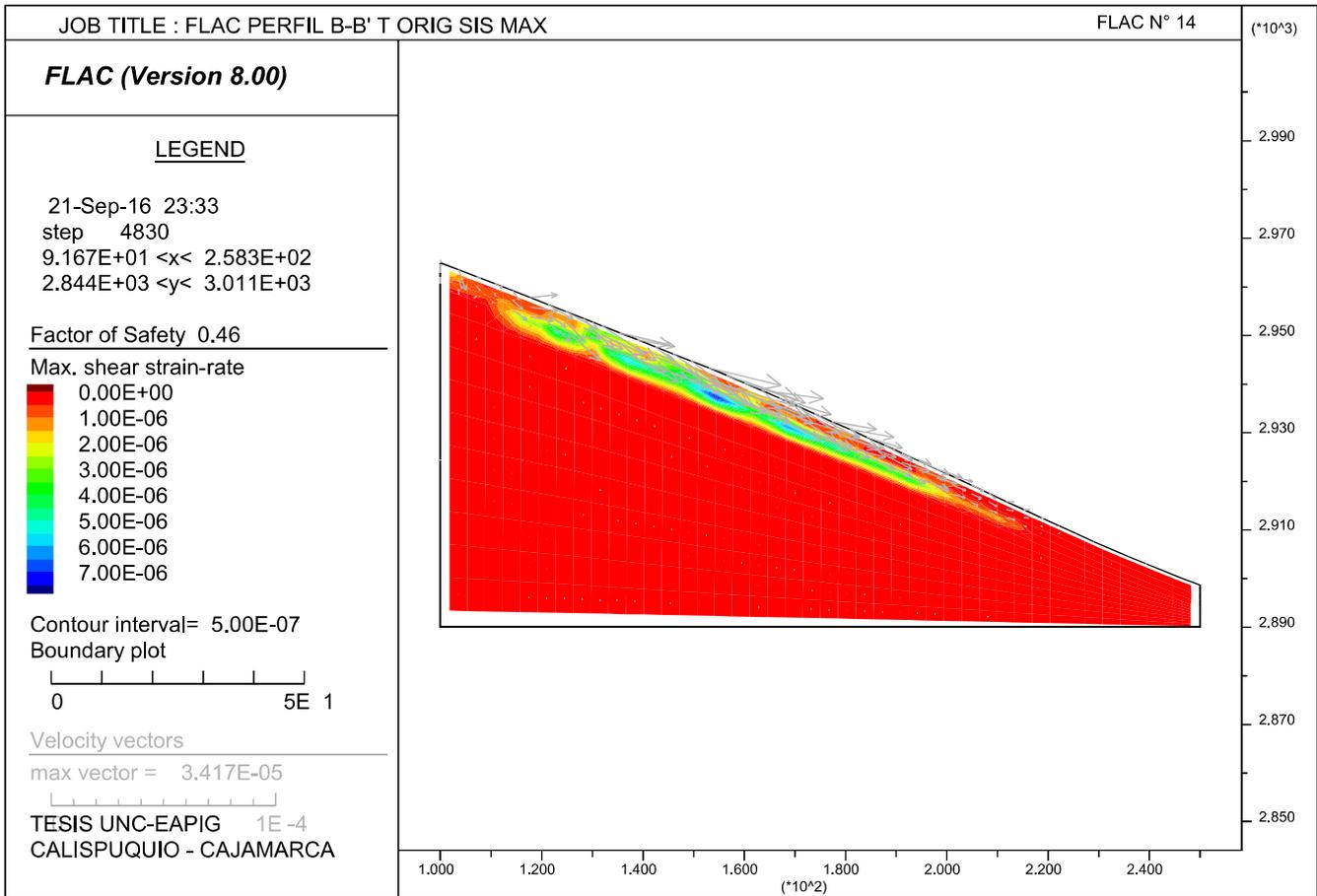
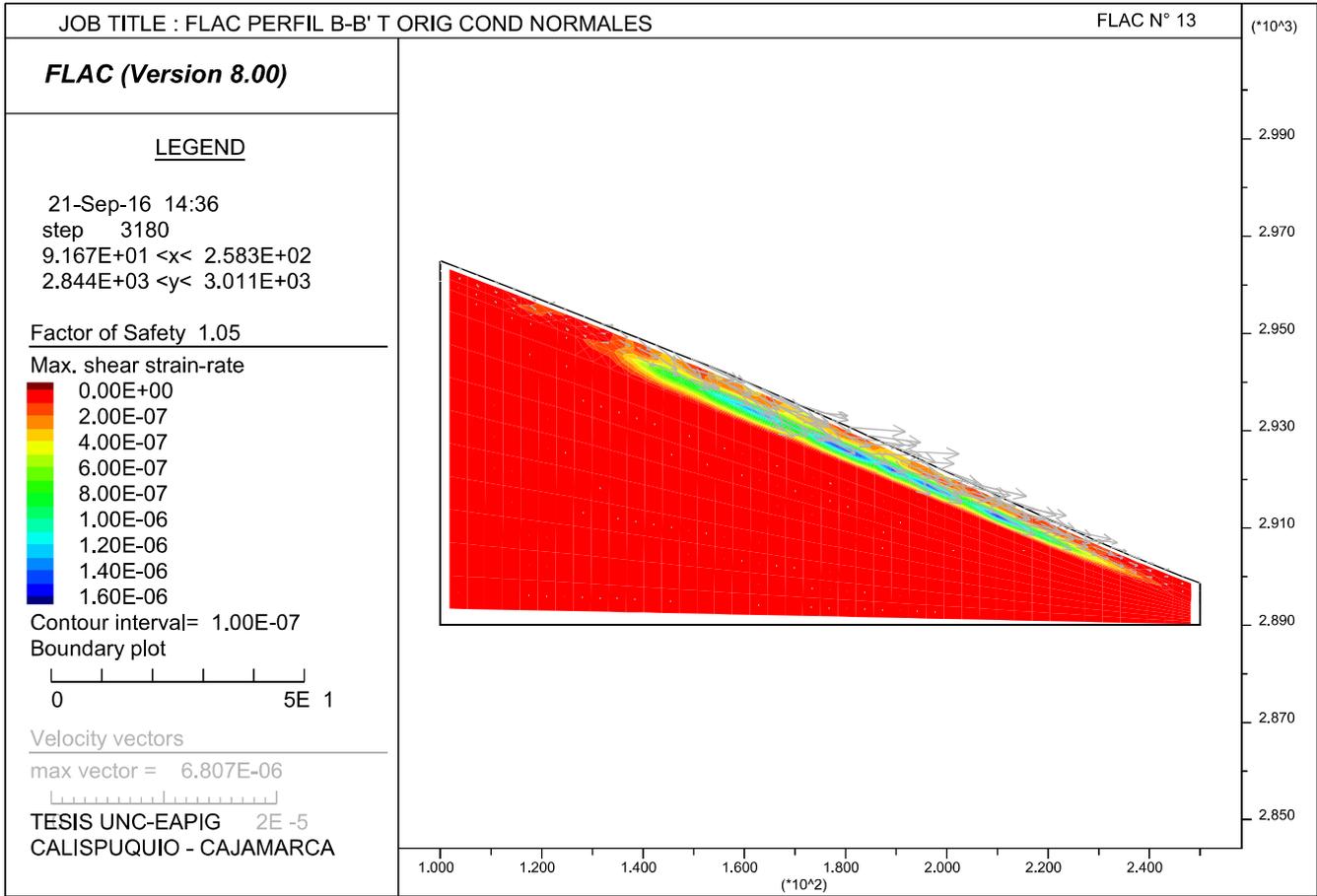


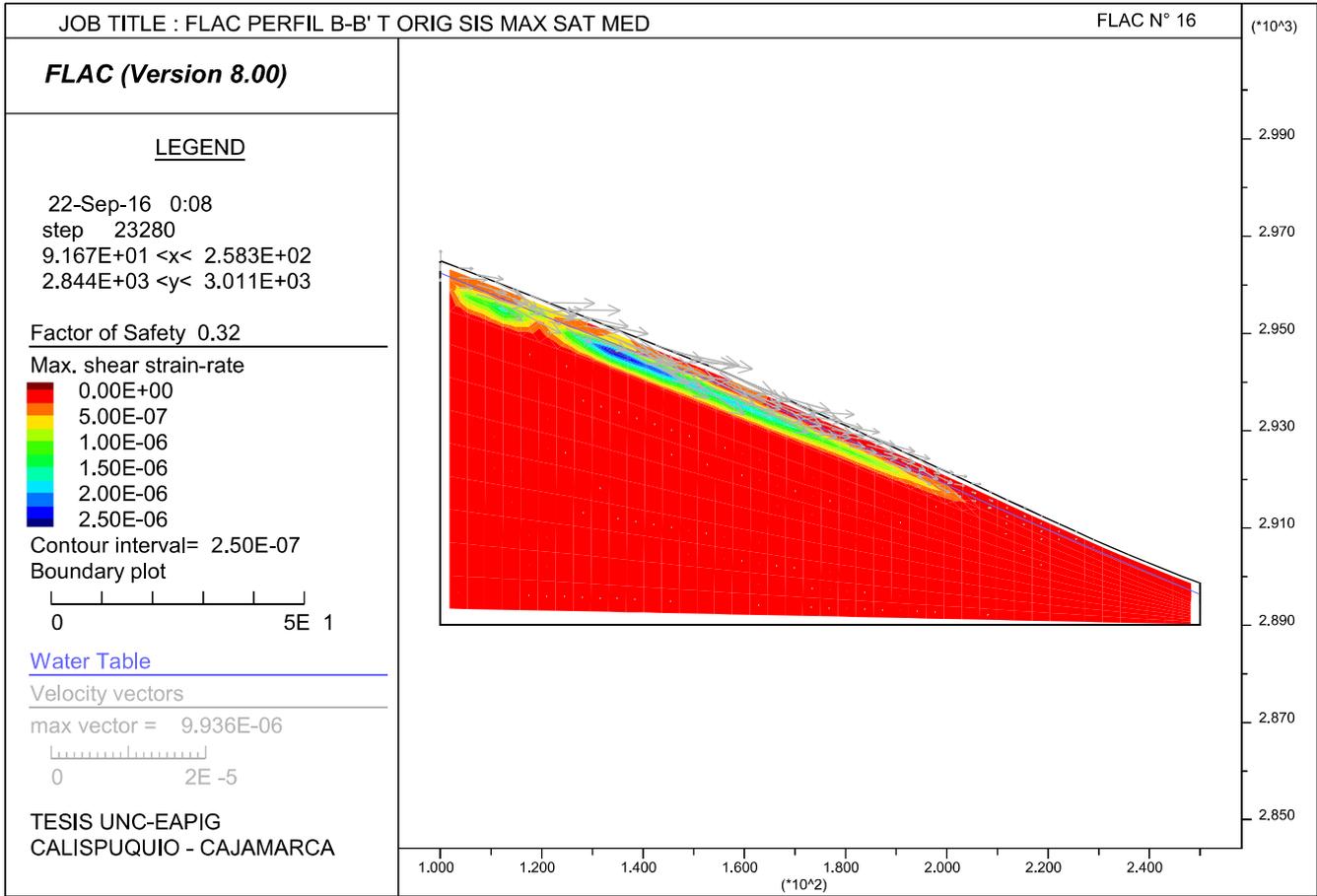
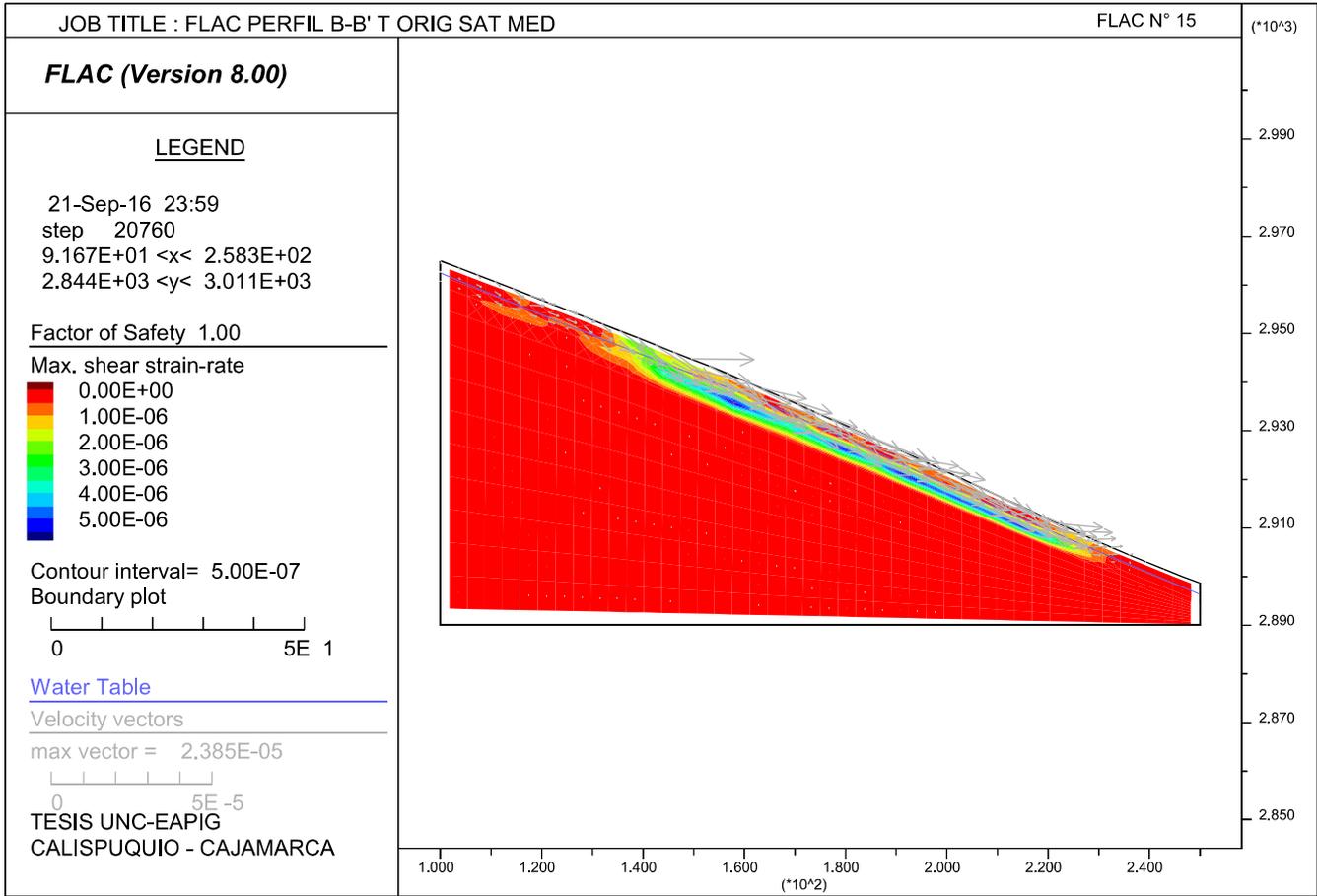


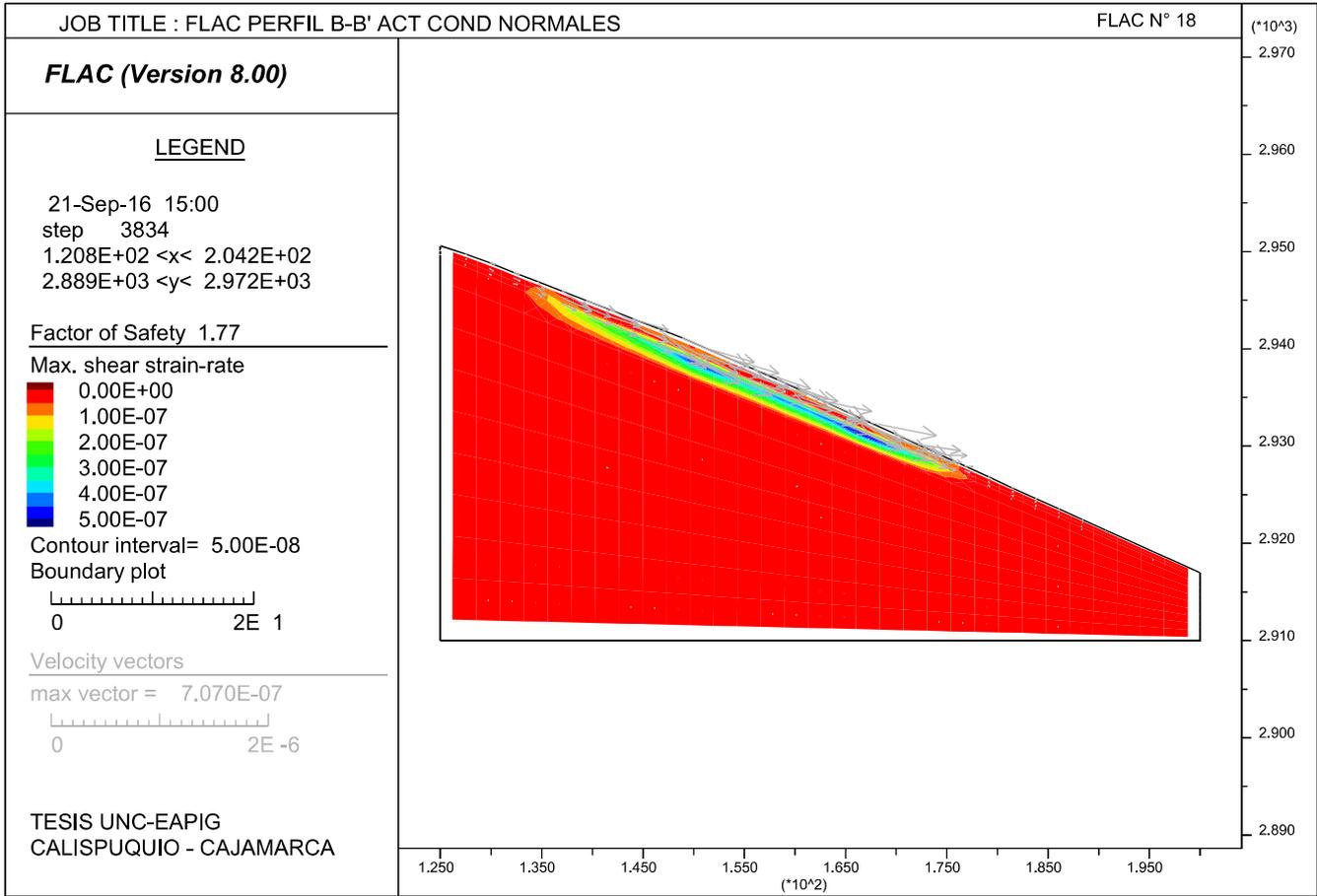
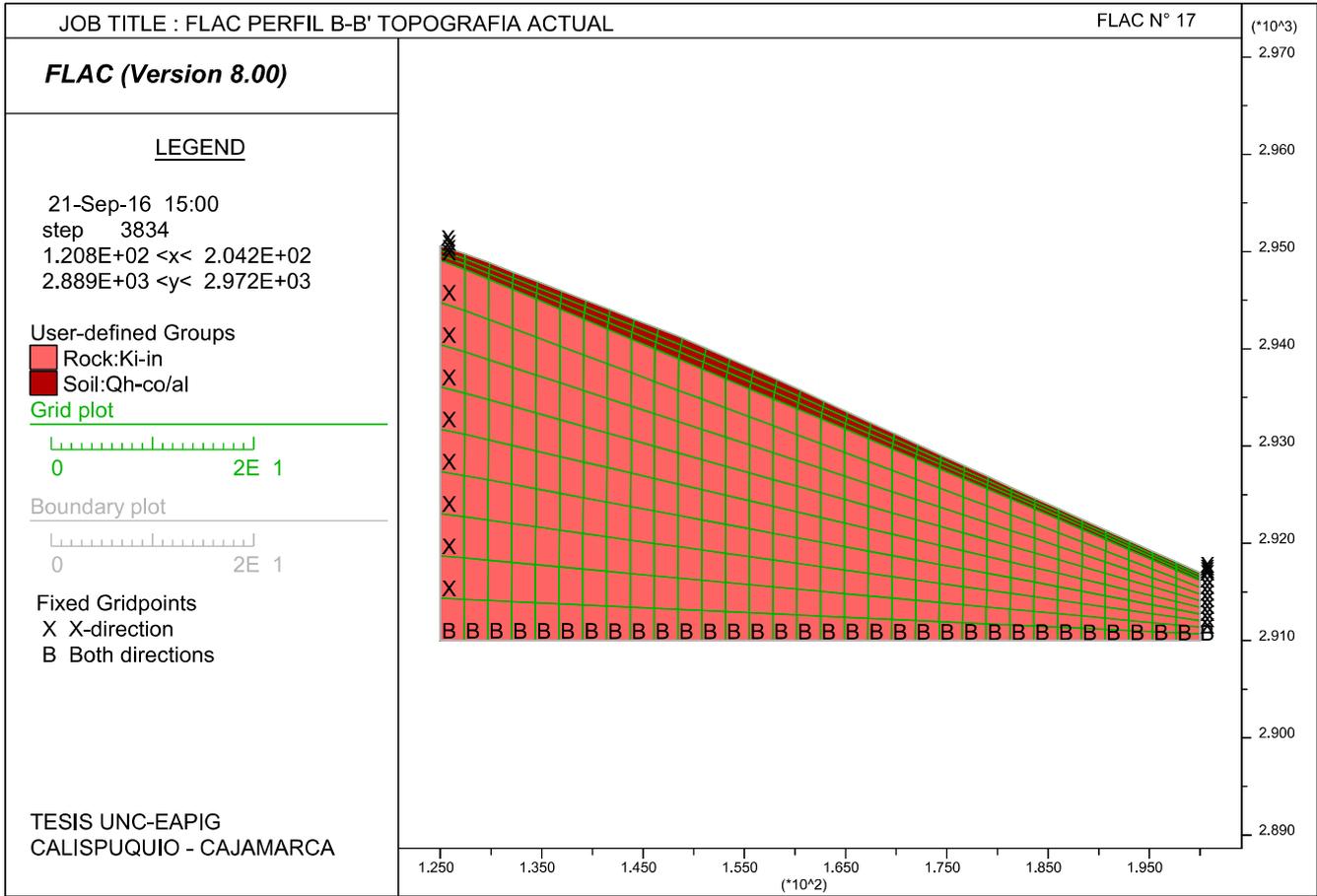


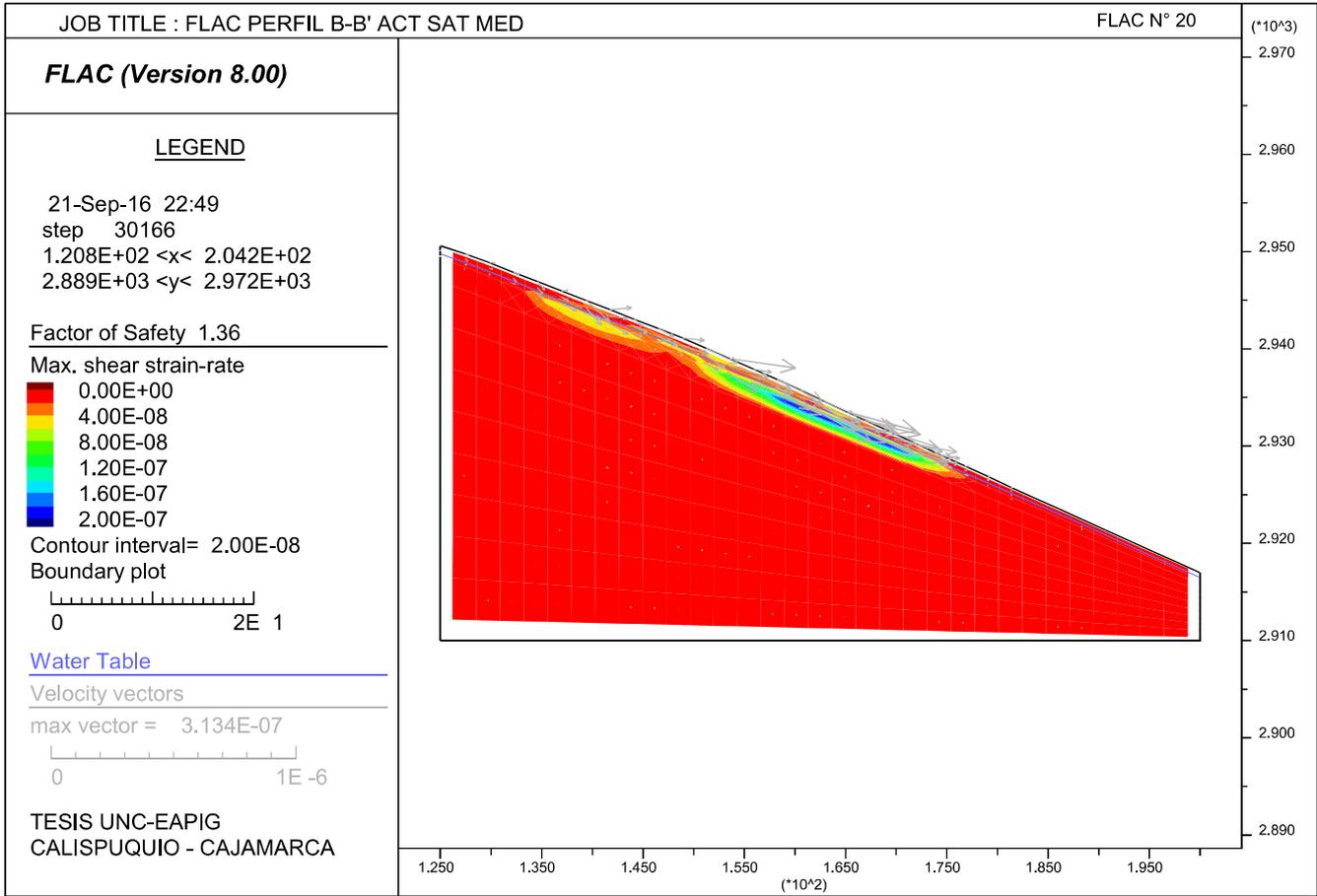
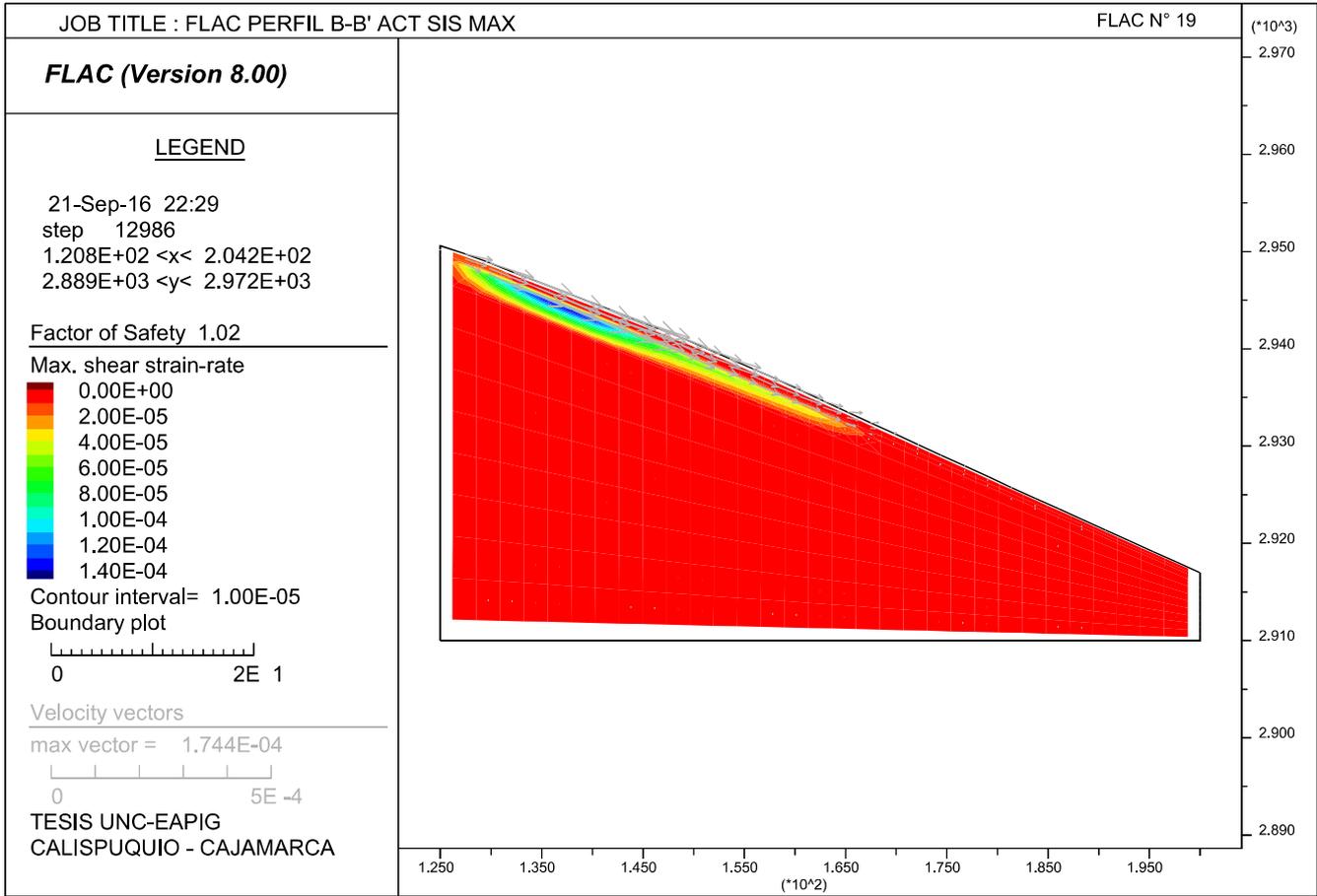


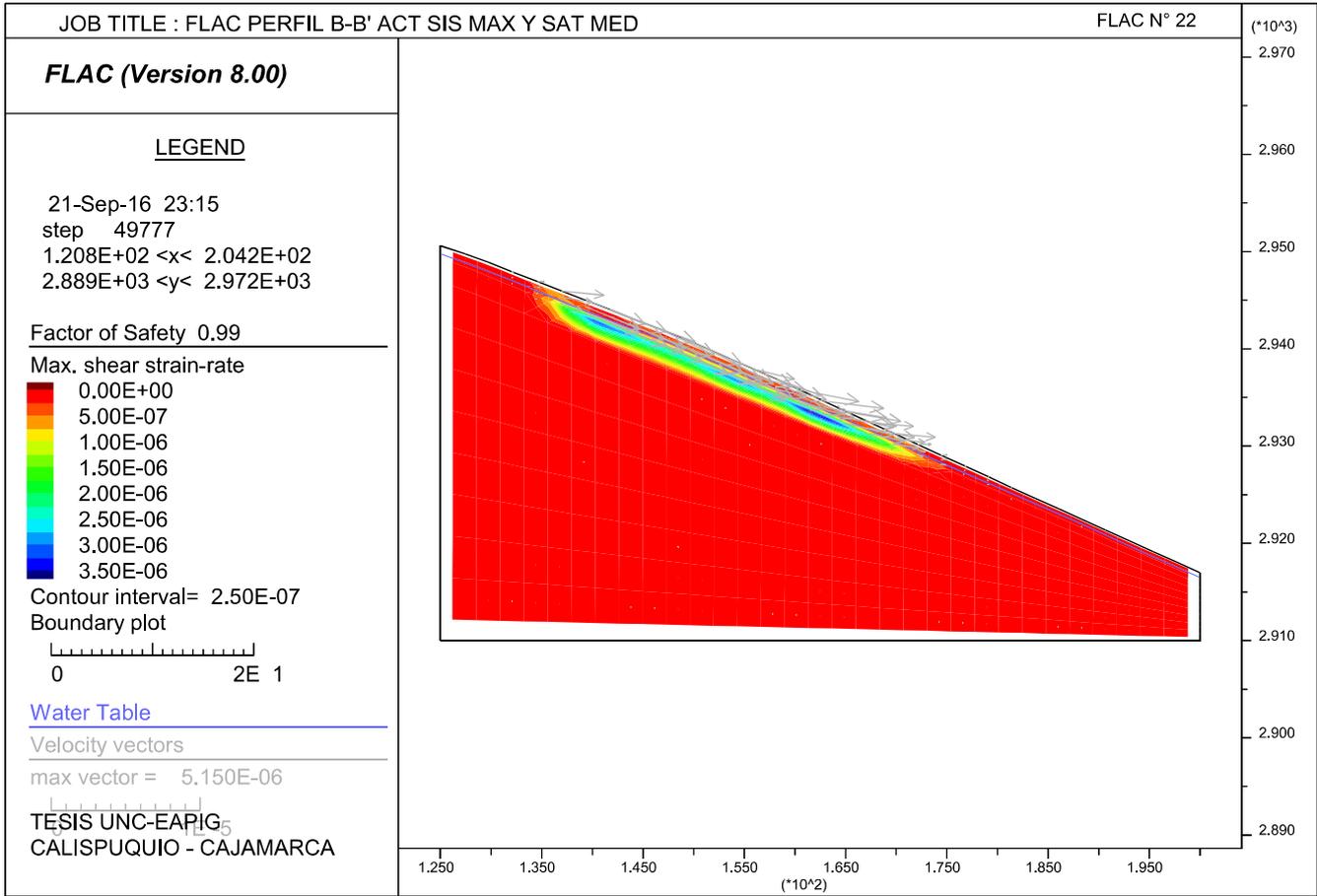
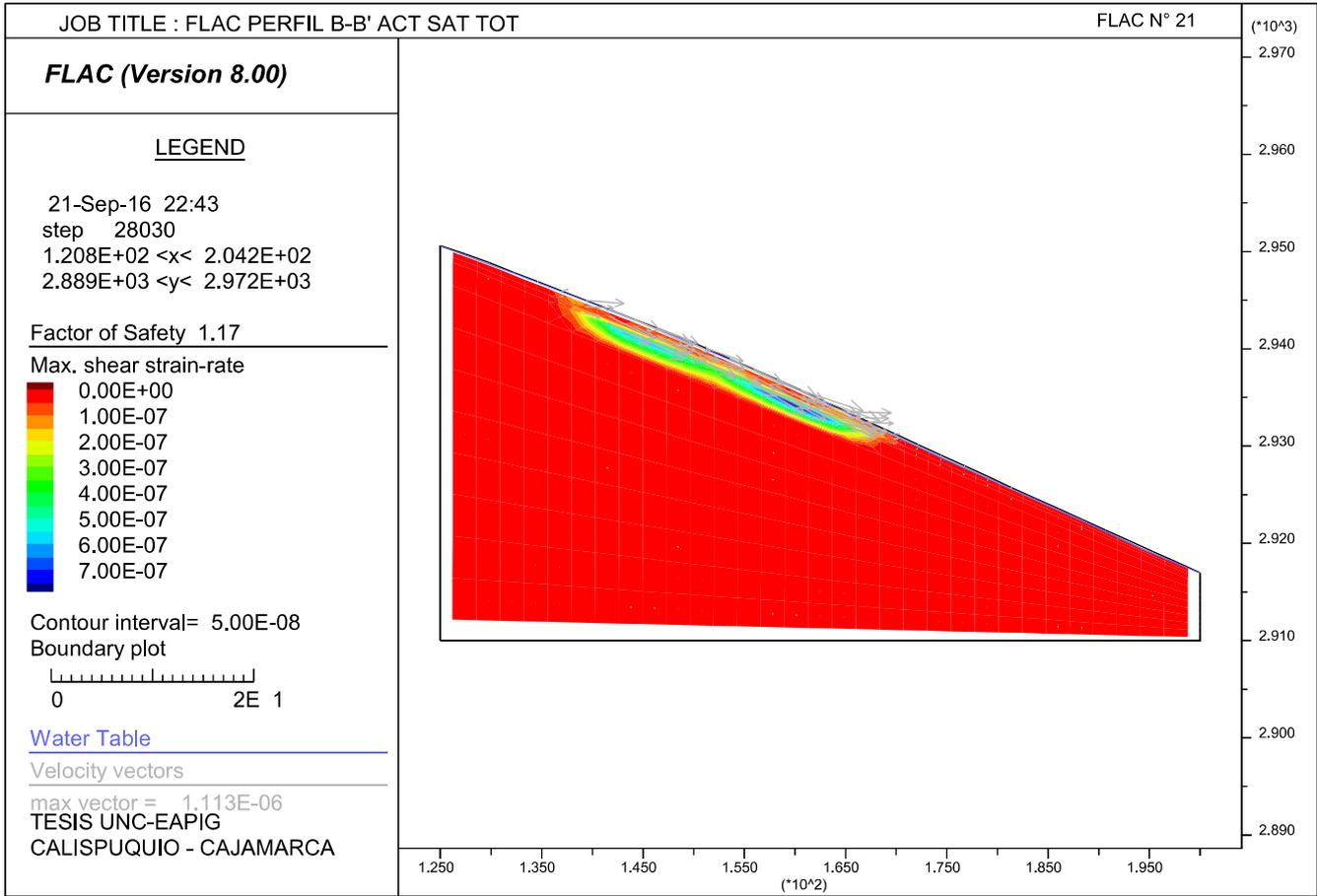


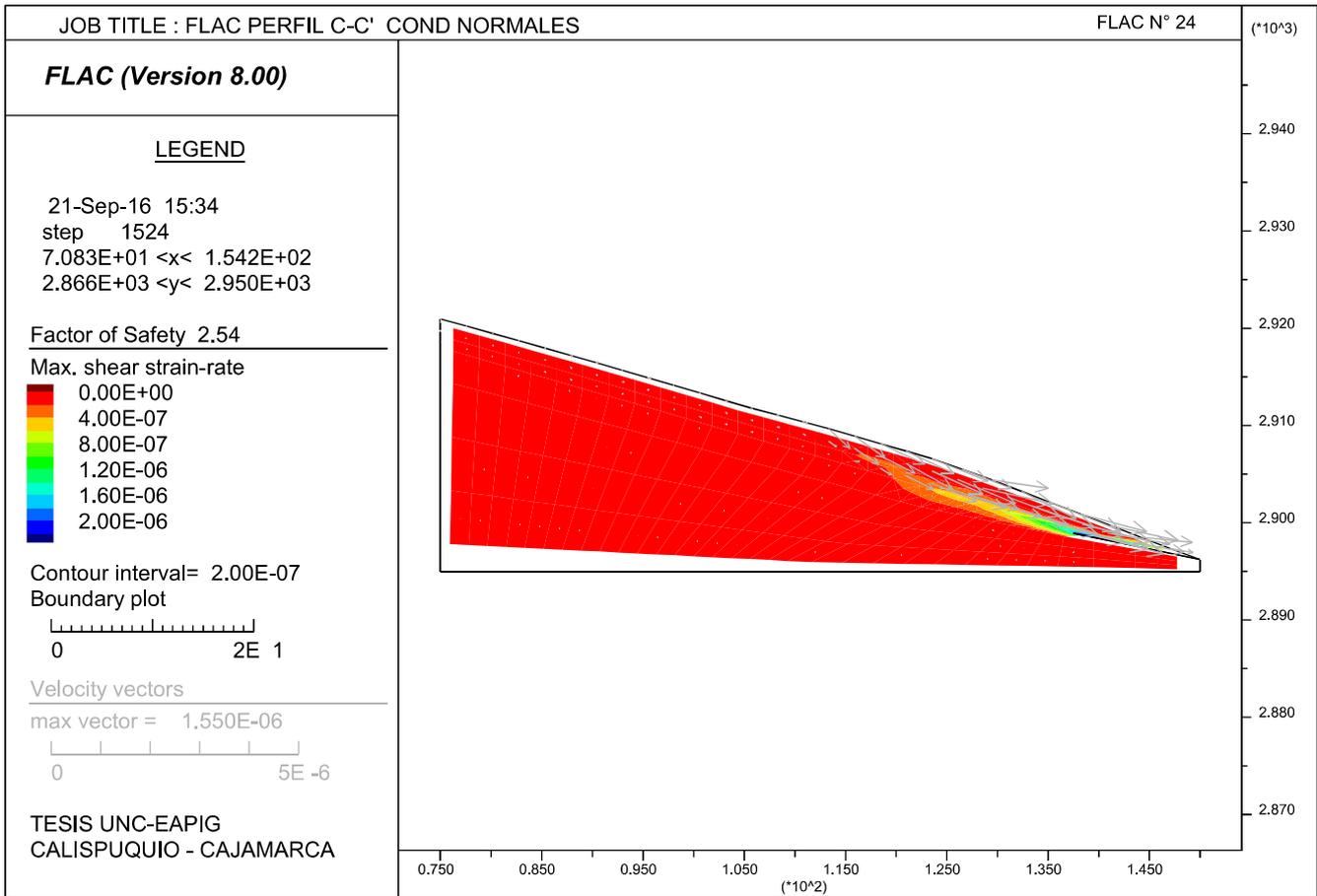
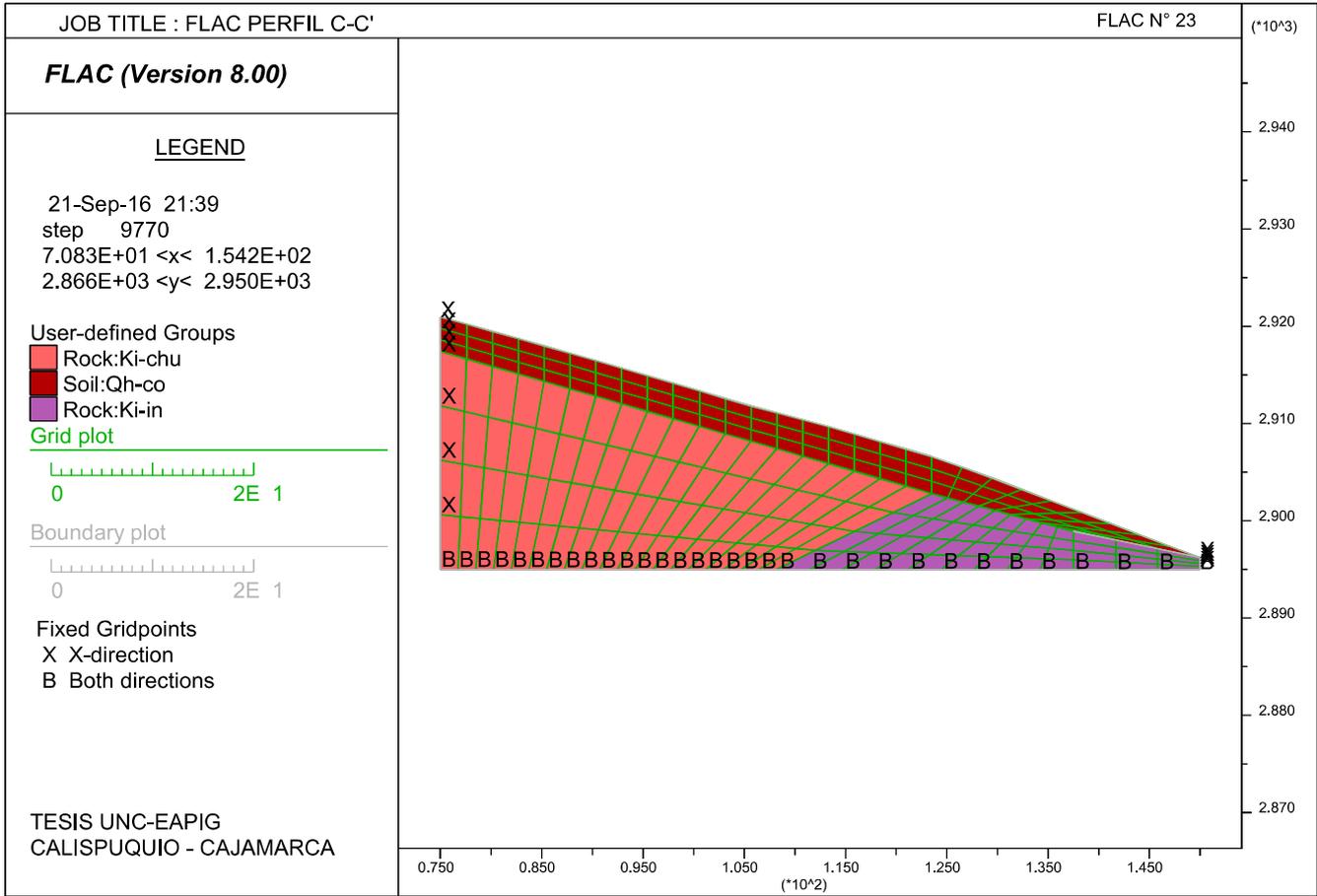


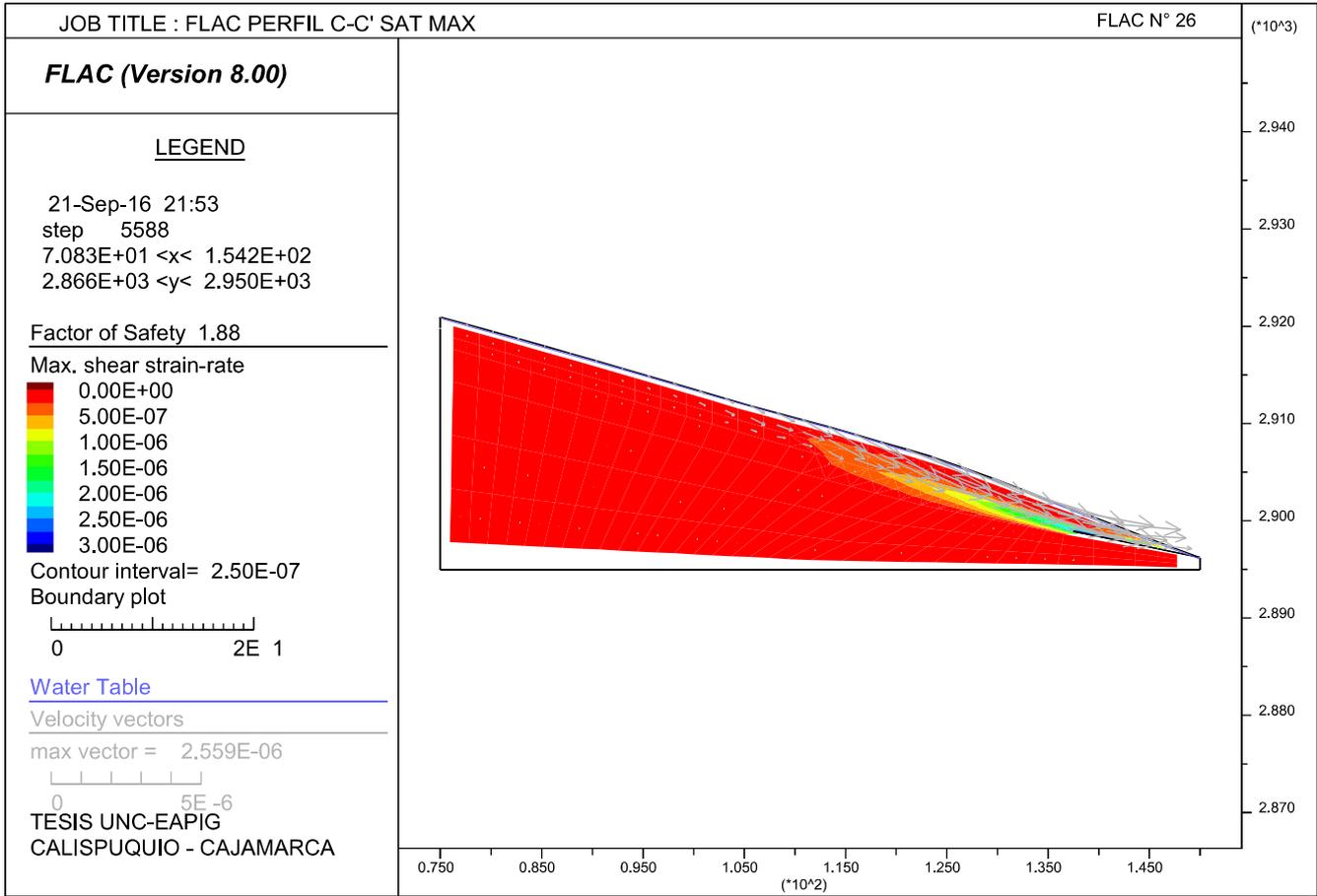
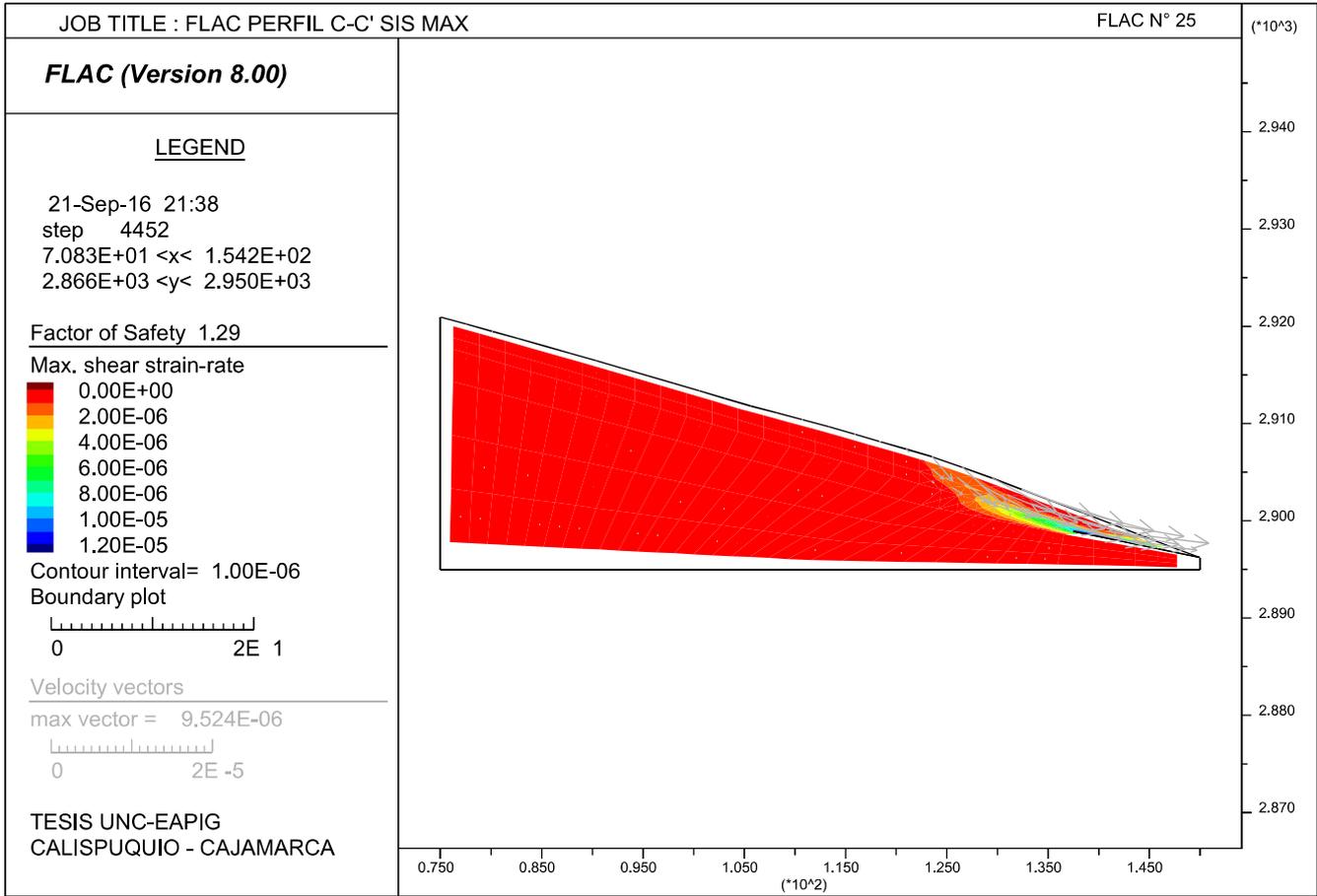


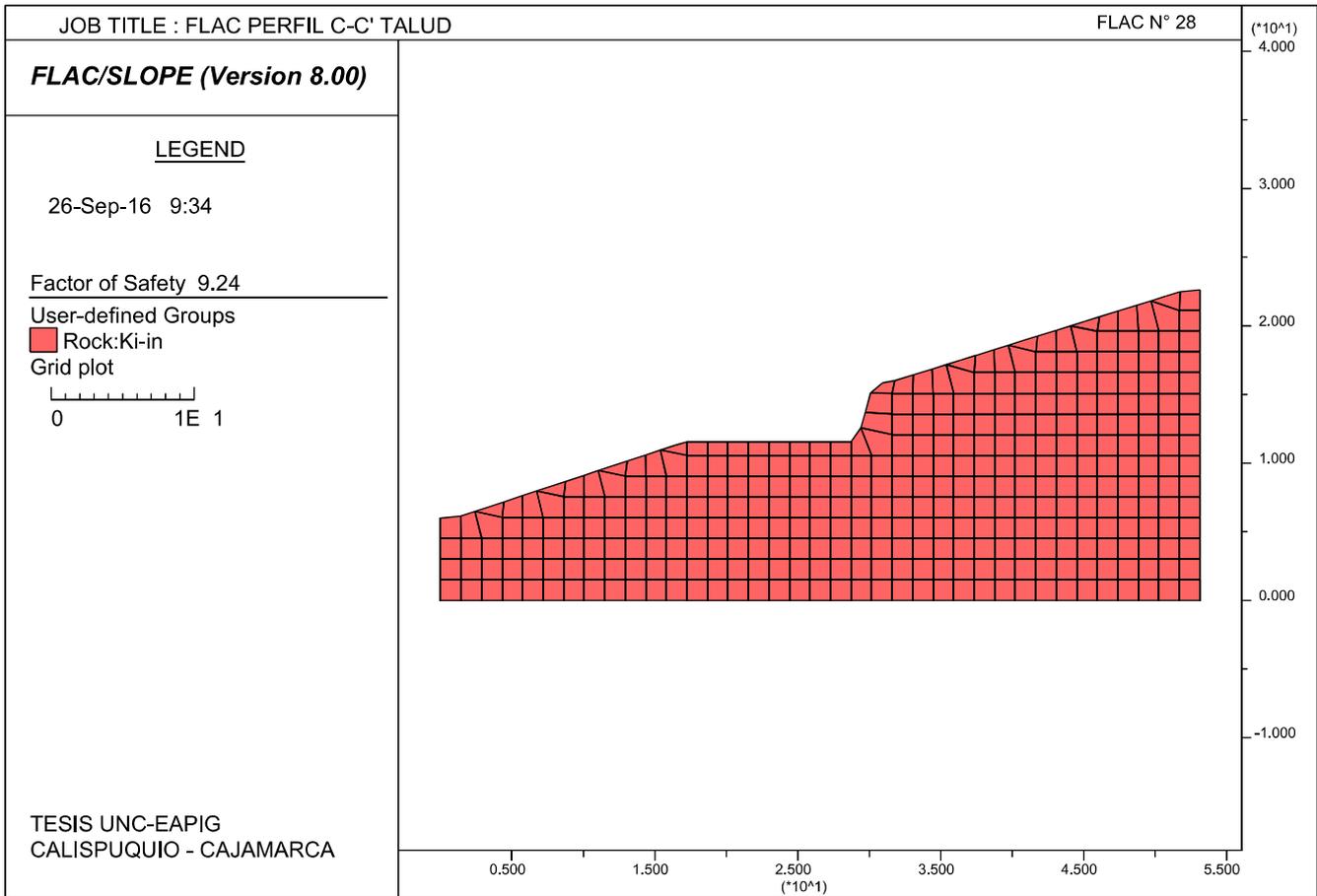
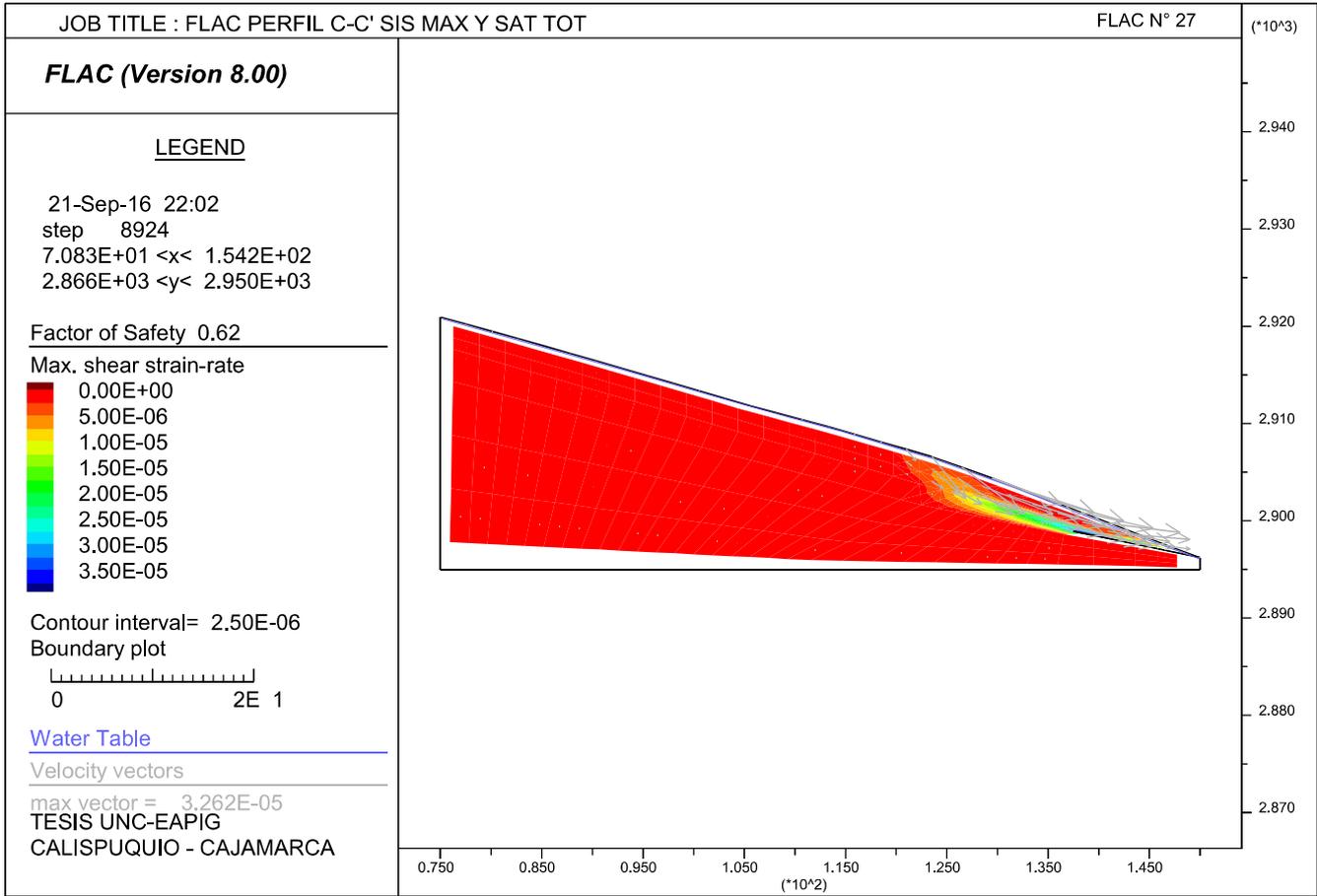


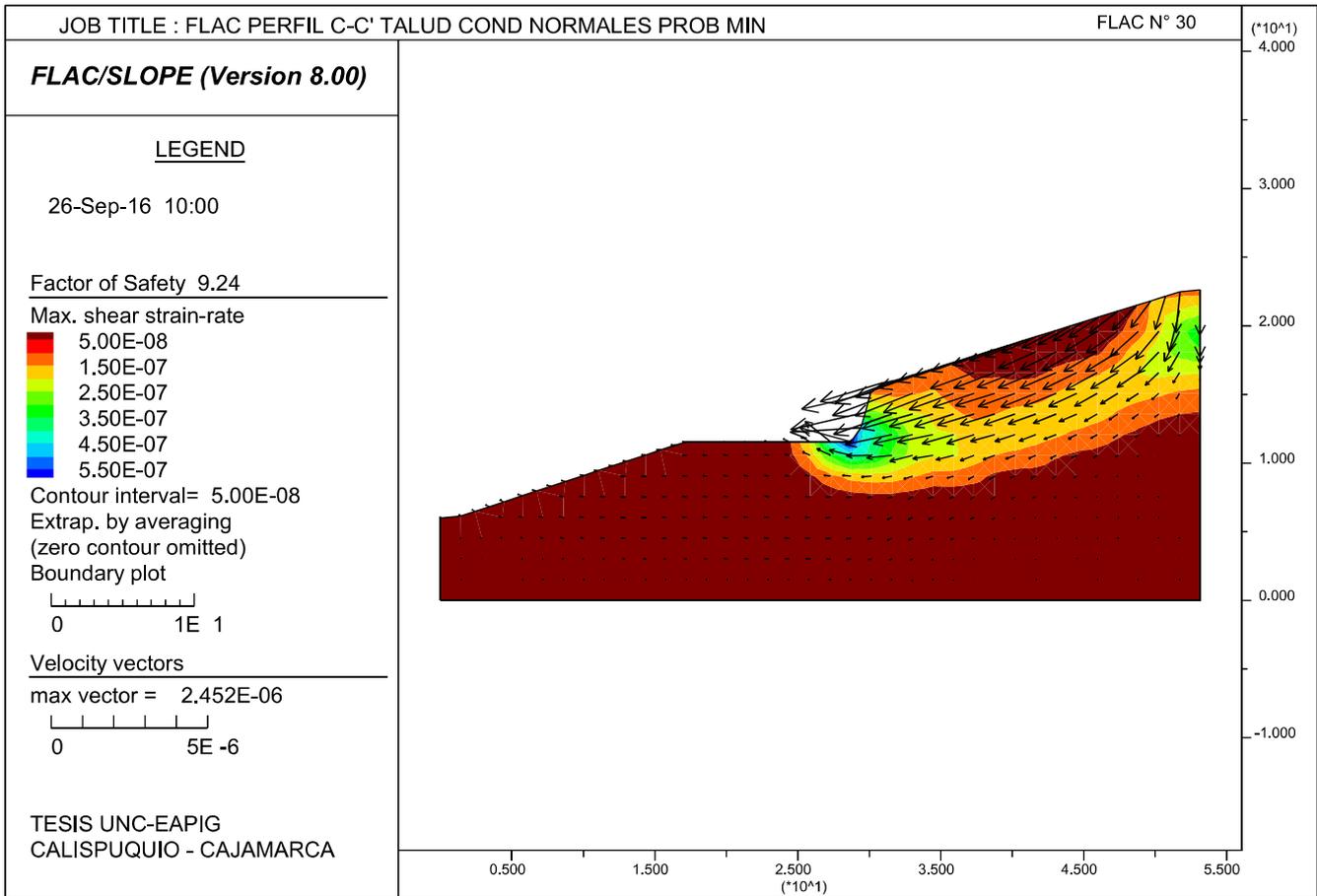
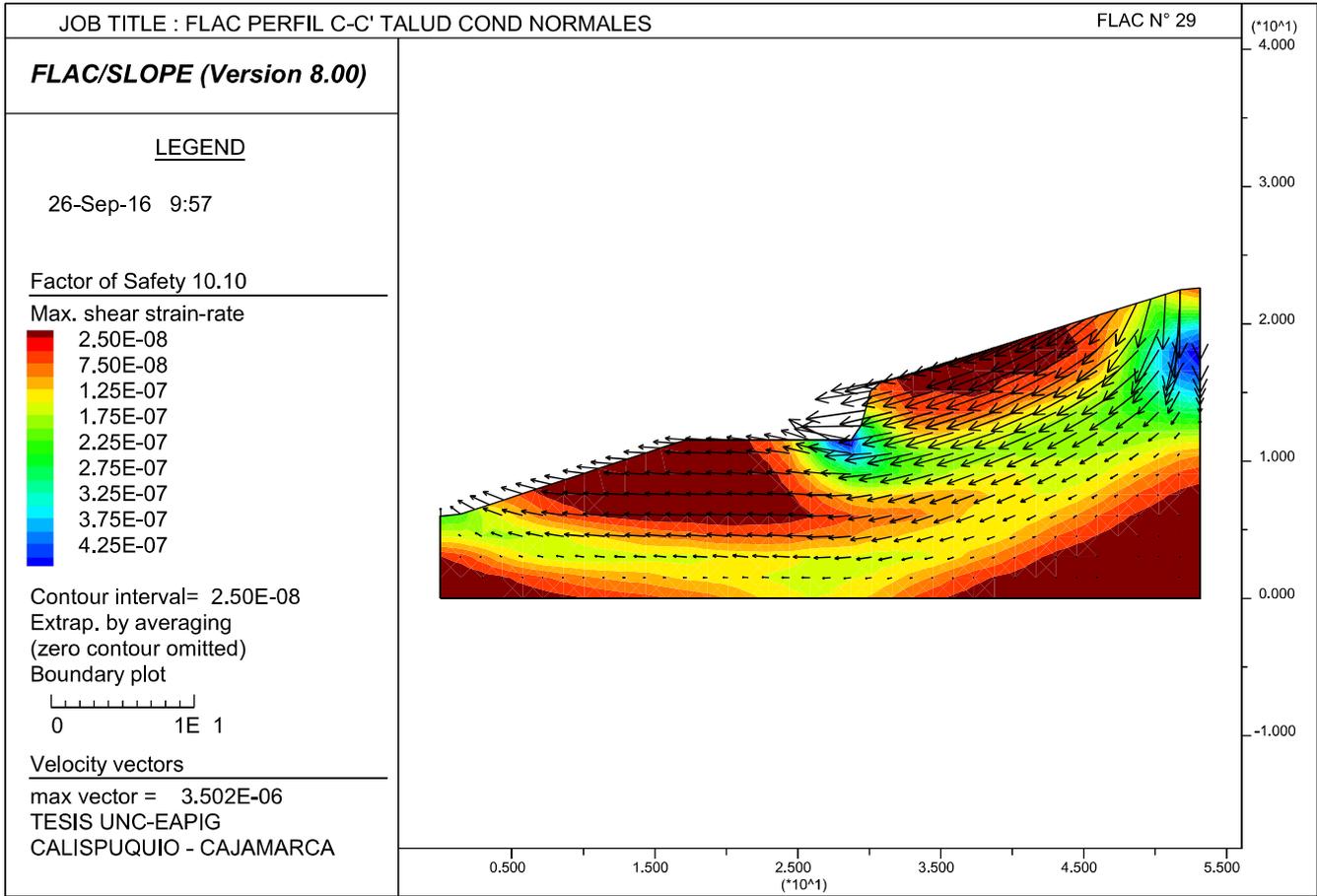


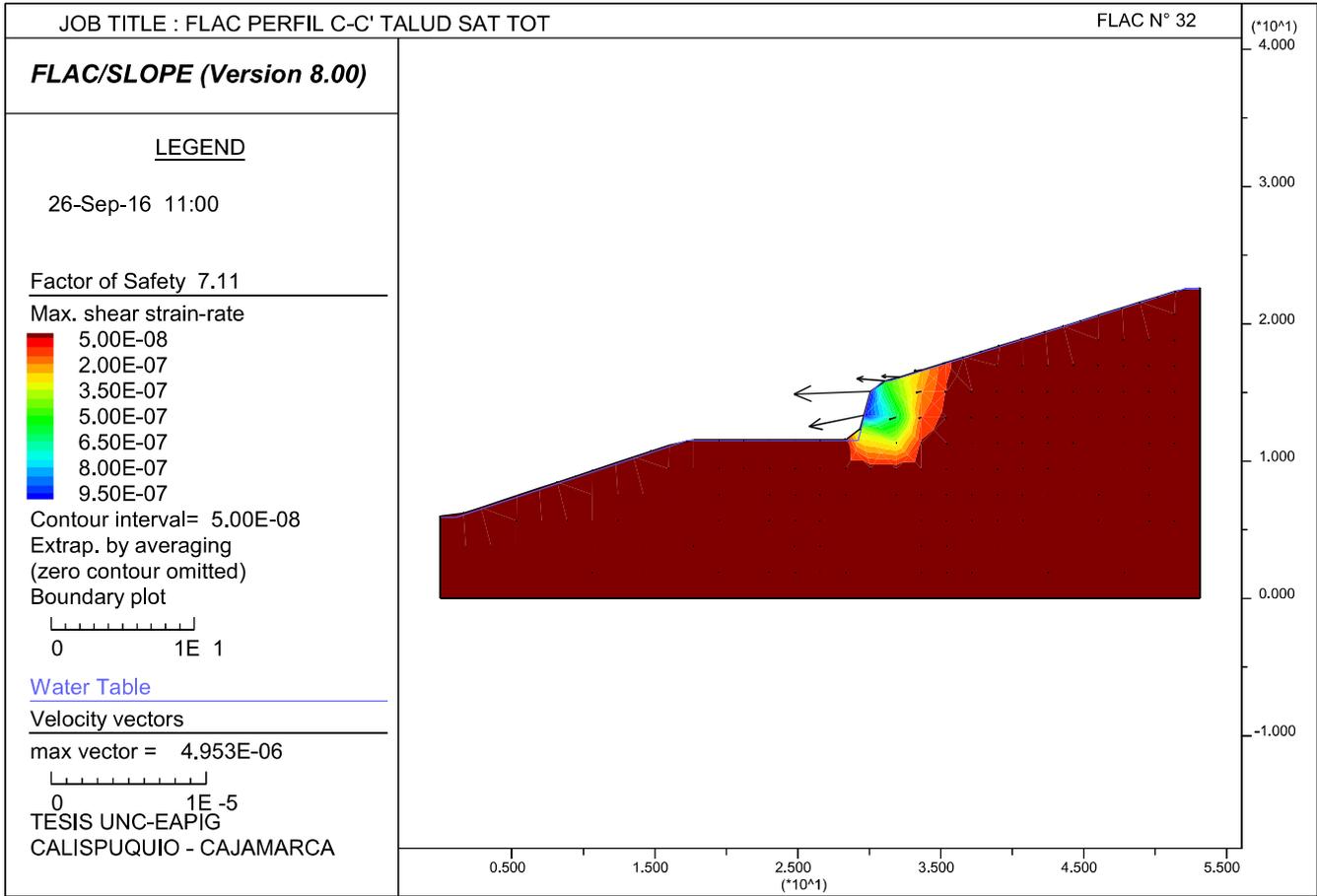
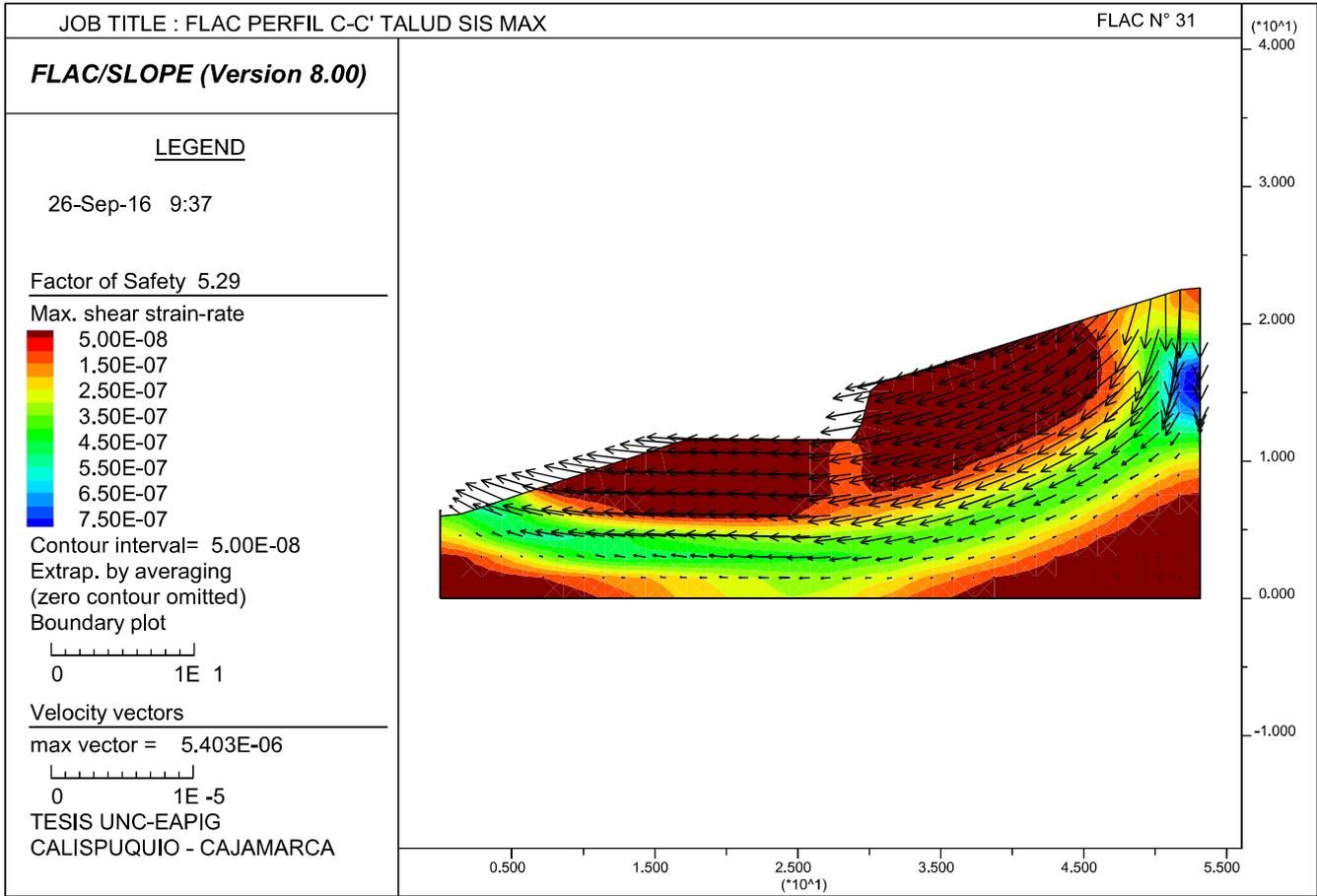


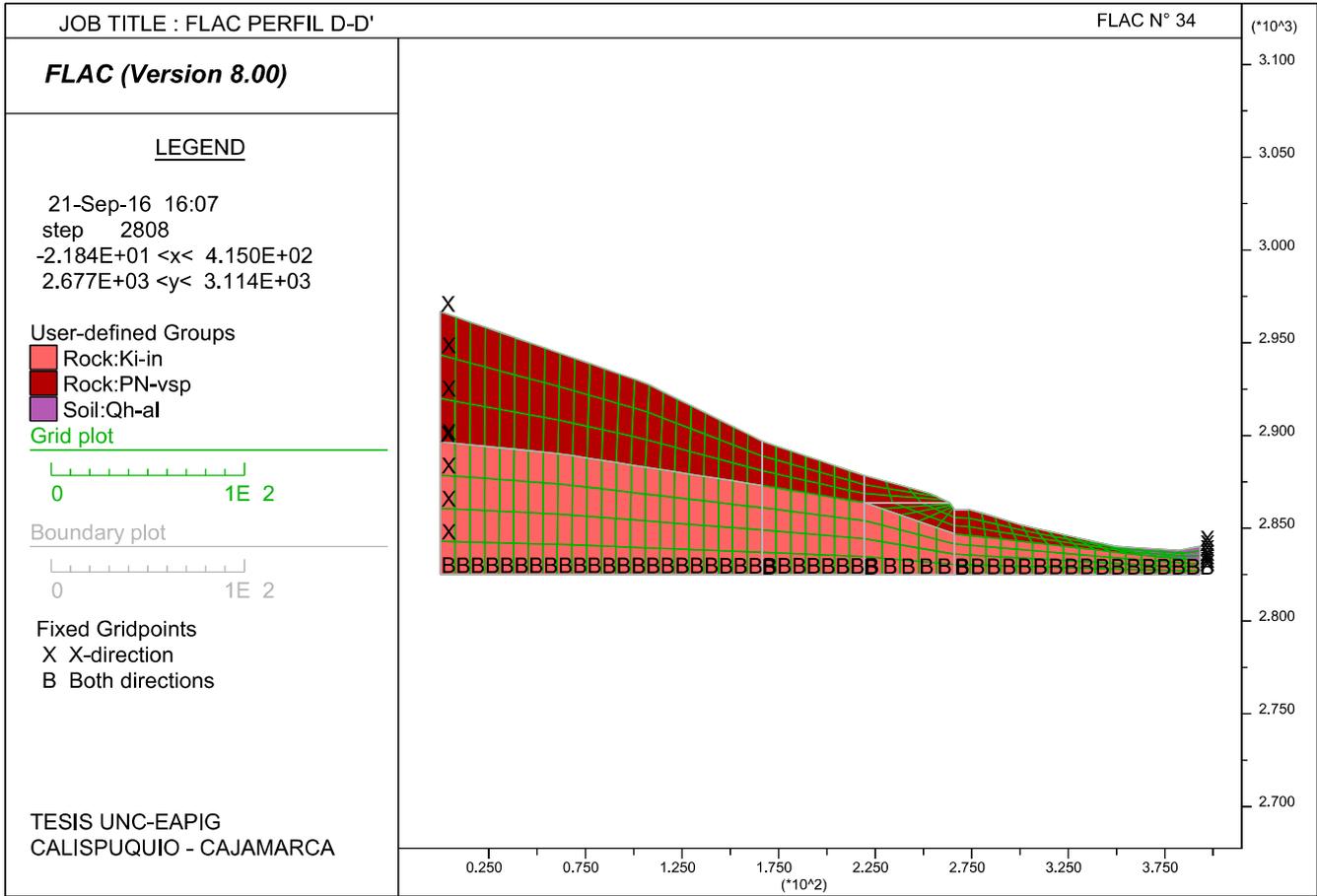
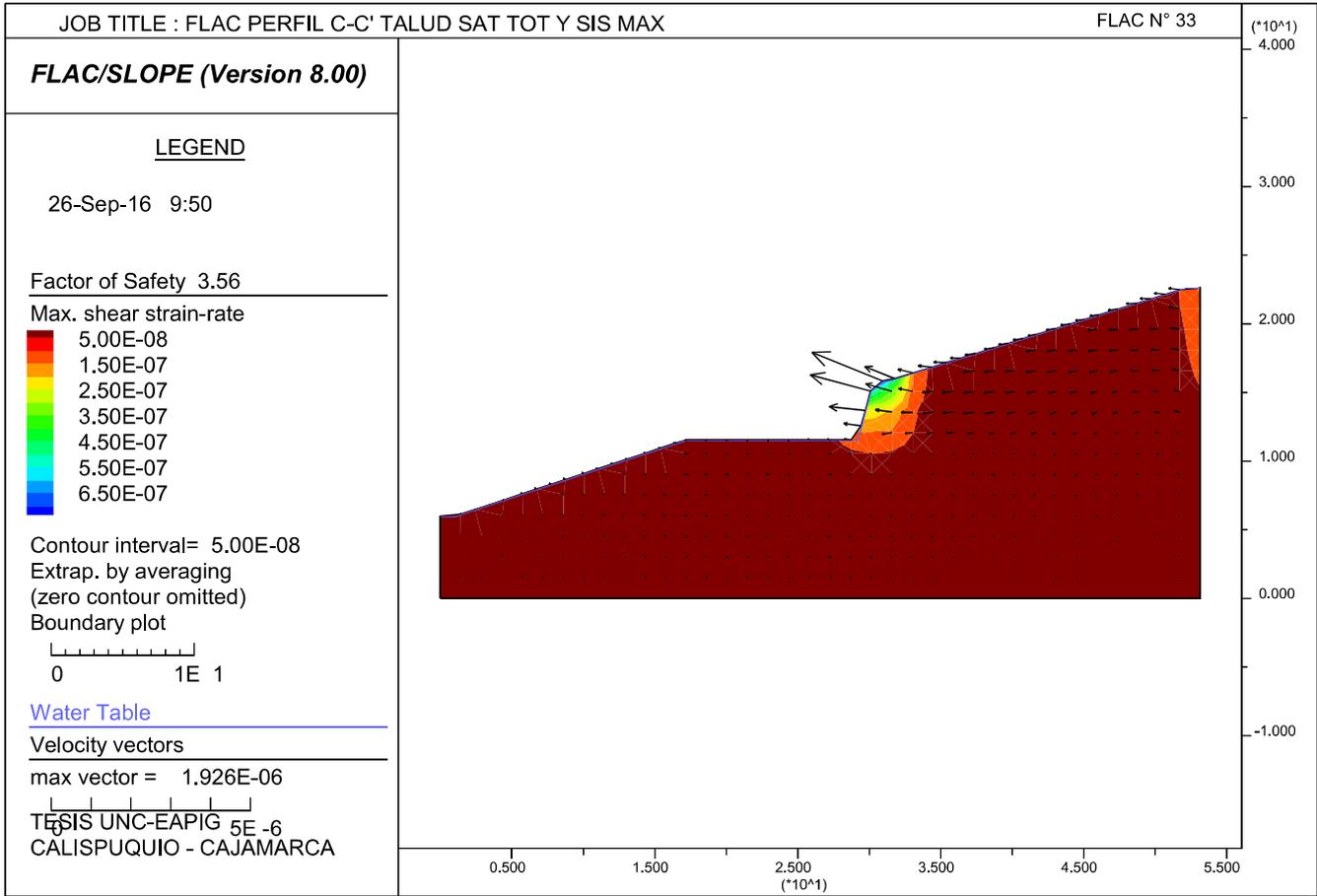


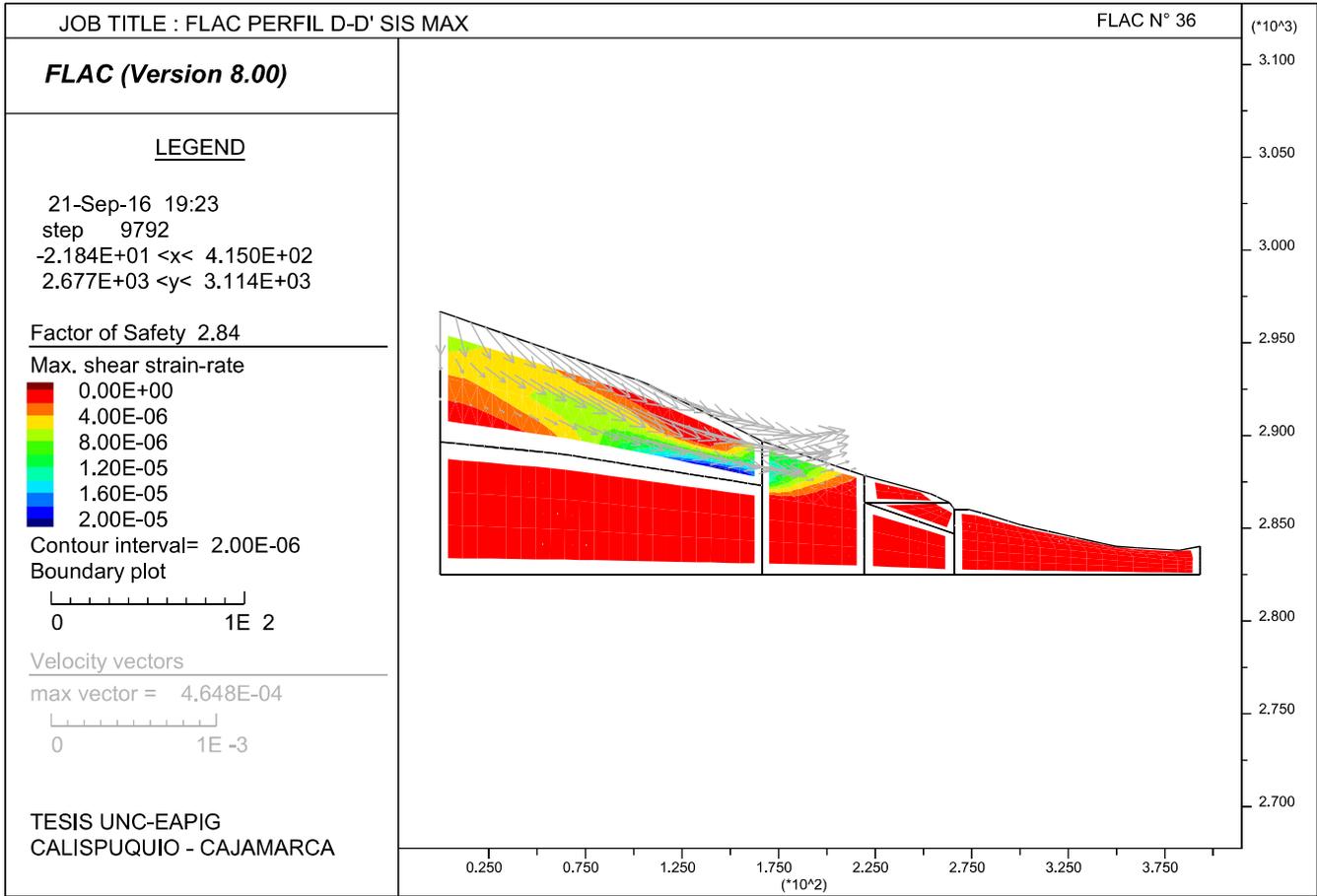
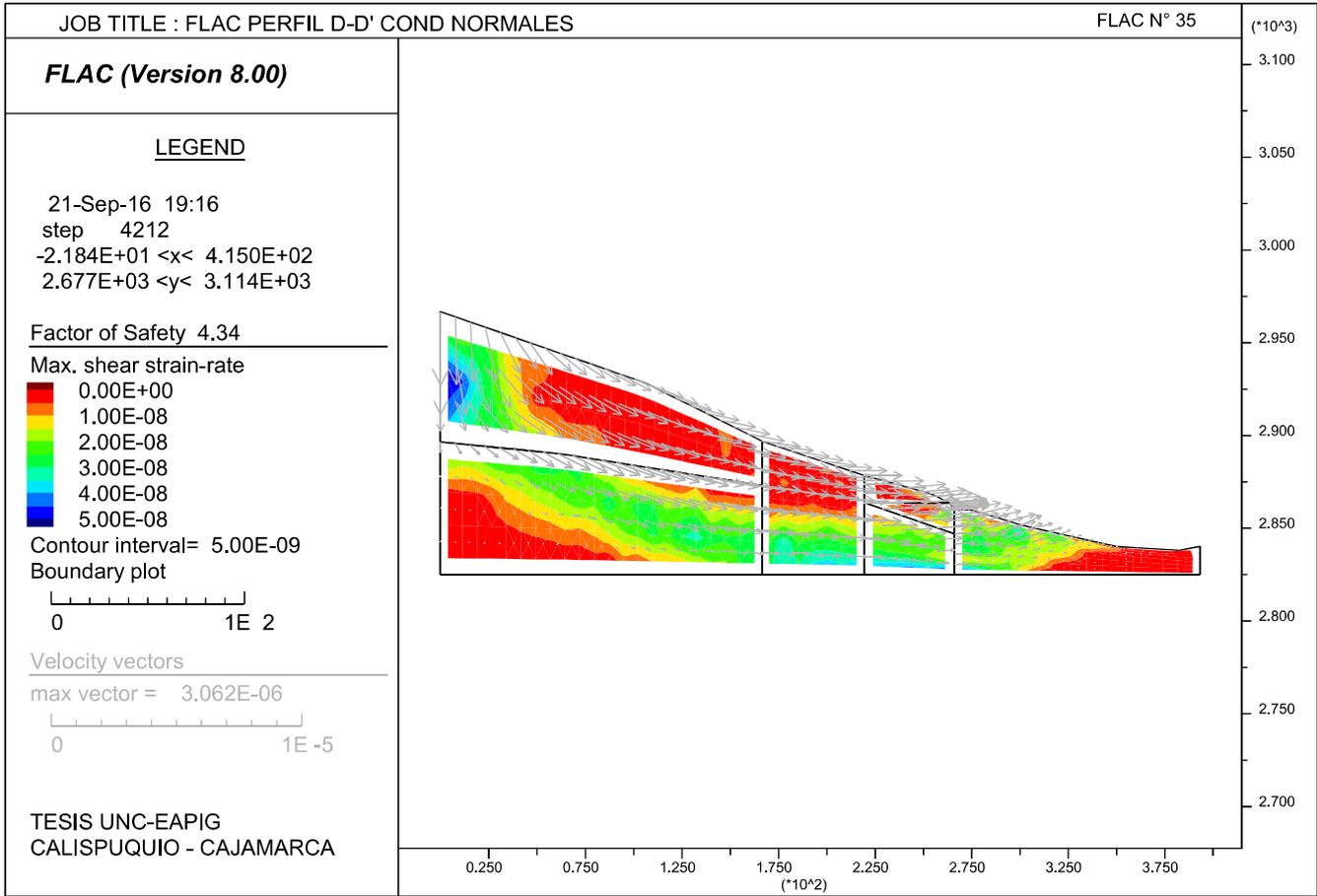


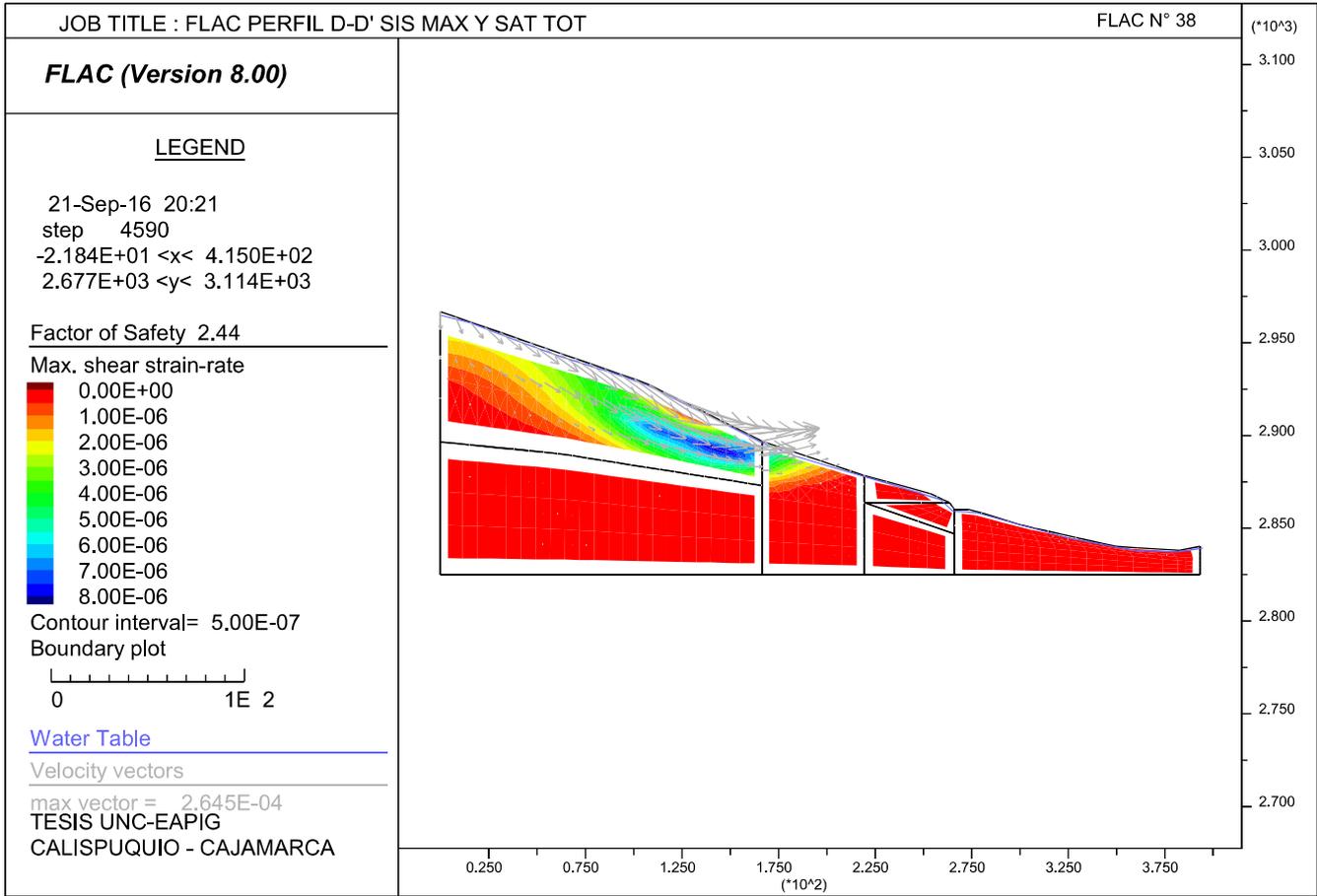
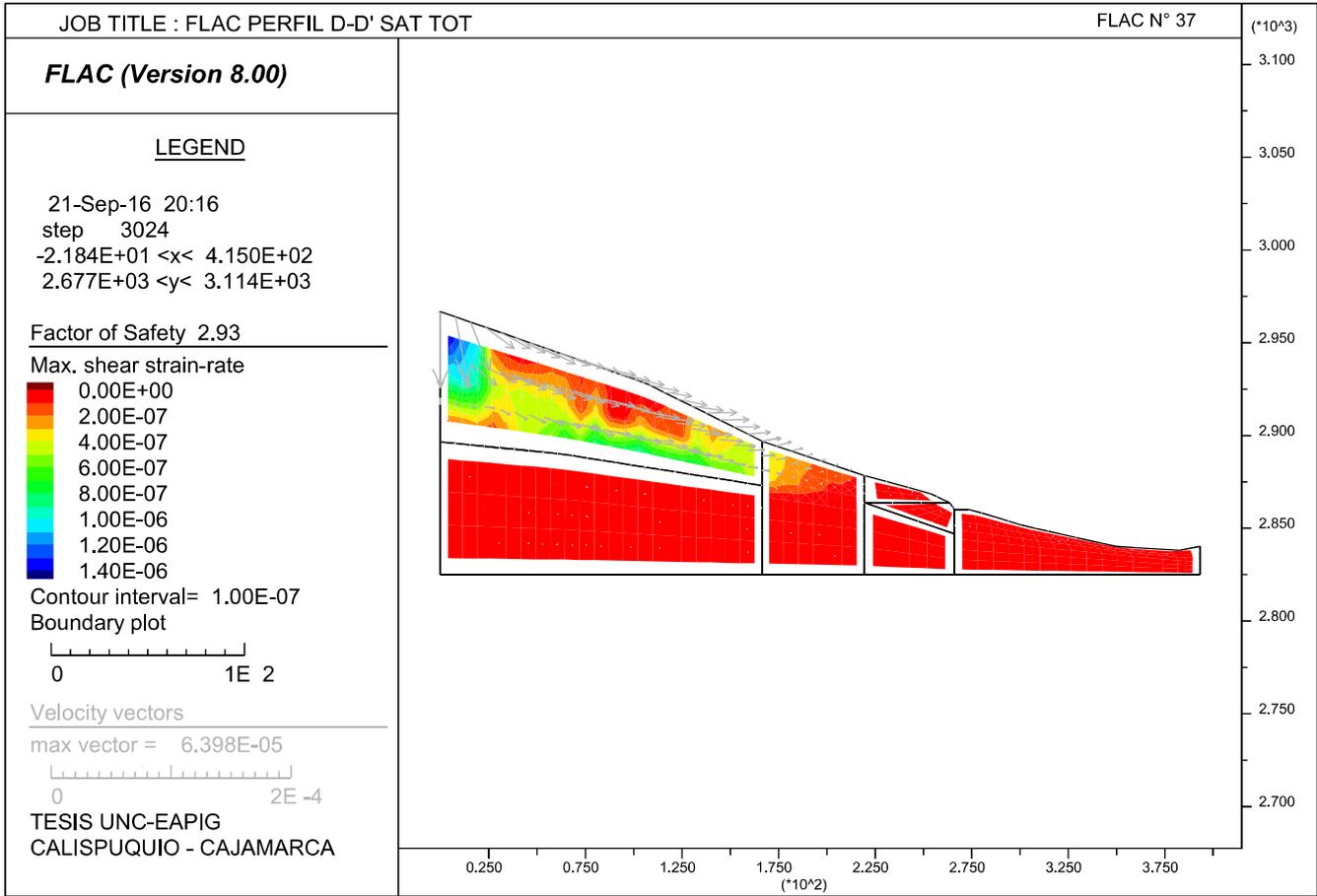


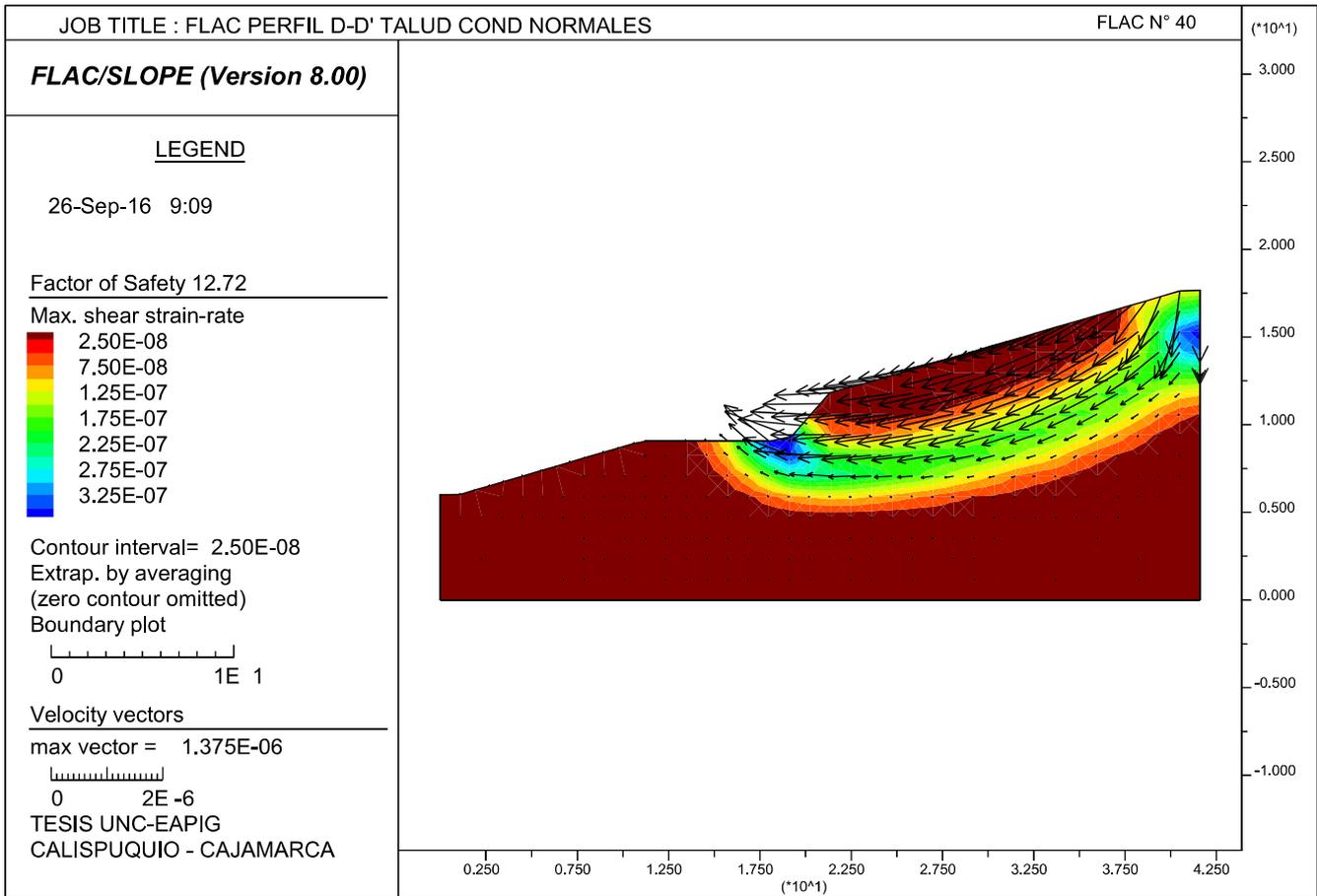
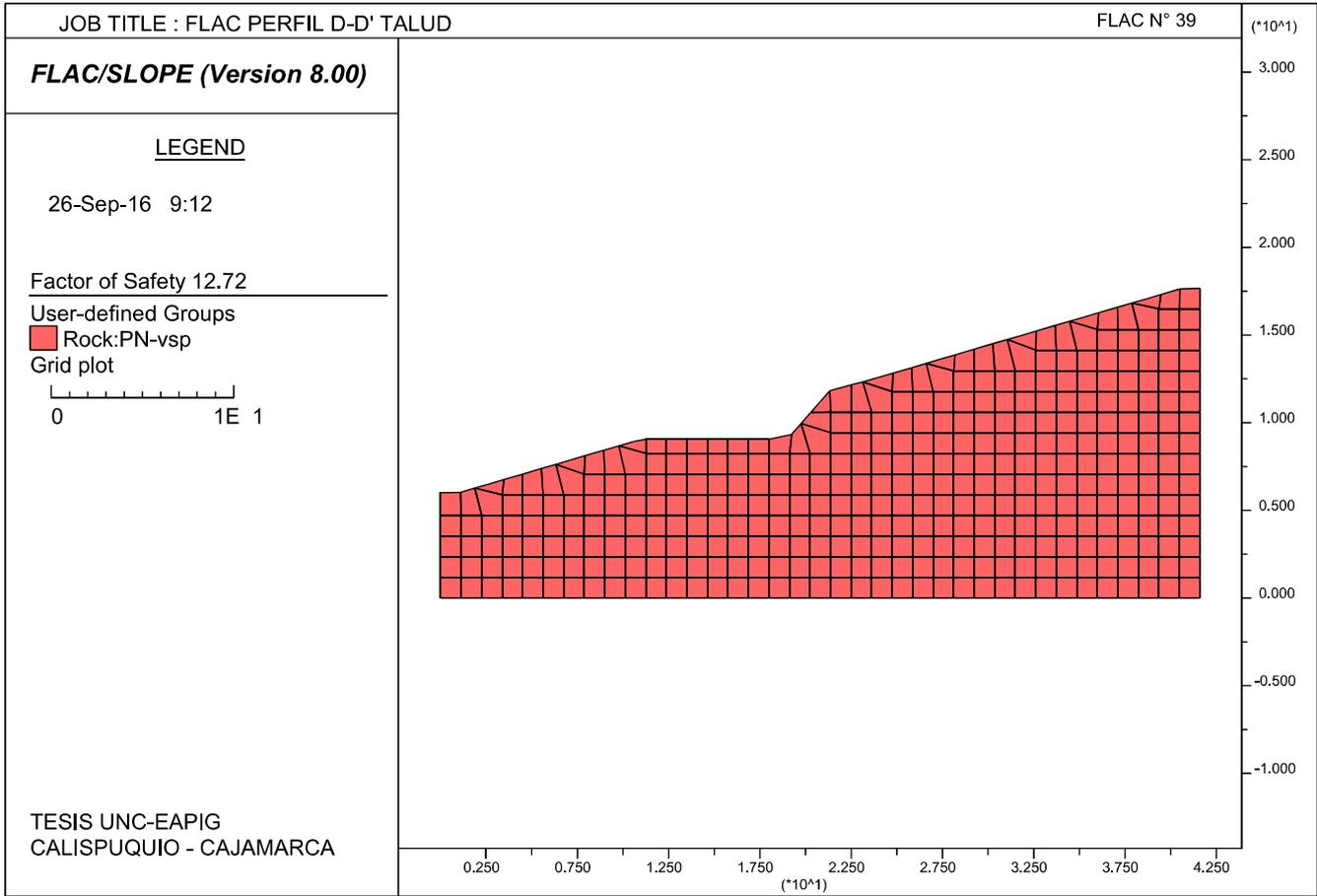


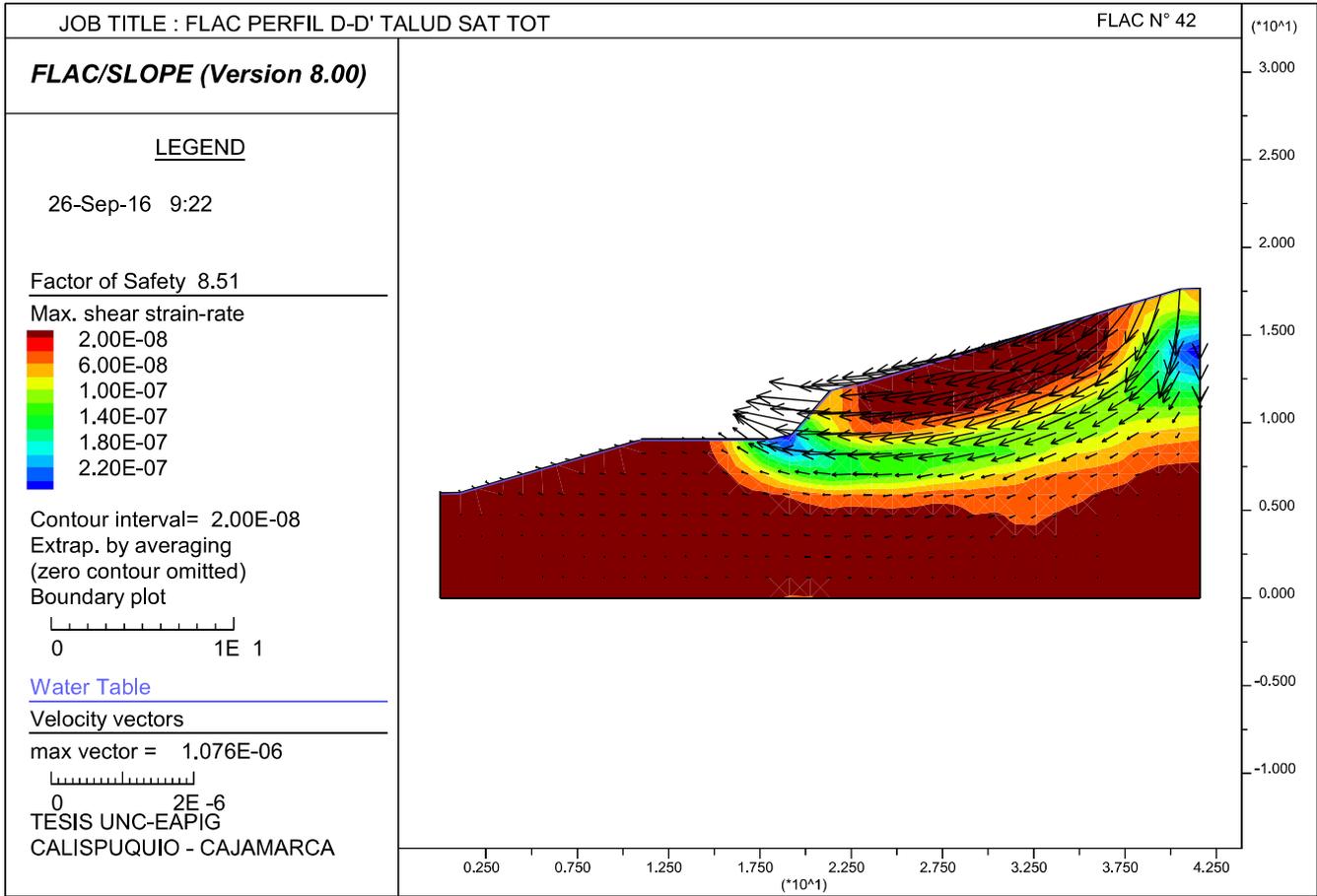
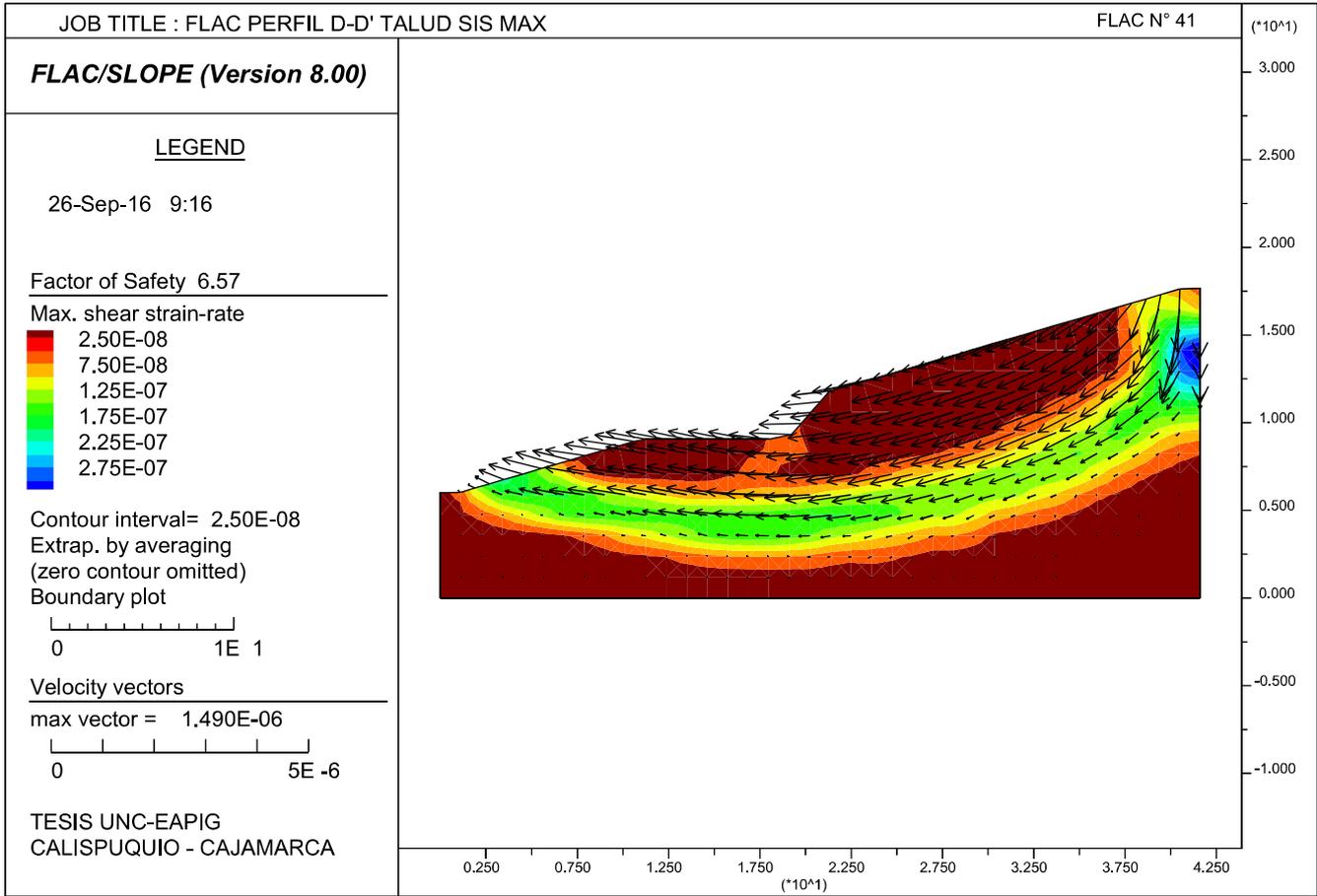












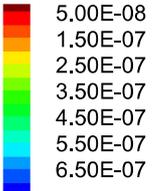
**FLAC/SLOPE (Version 8.00)**

LEGEND

26-Sep-16 9:27

Factor of Safety 4.13

Max. shear strain-rate



Contour interval= 5.00E-08

Extrap. by averaging

(zero contour omitted)

Boundary plot



Water Table

Velocity vectors

max vector = 2.390E-06

TECIS UNC-EAPIC-6  
CALISPUQUIO - CAJAMARCA

