



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCA.
CASO PRÁCTICO; TALUD IZQUIERDO DEL VERTEDOR
DE LA C.H. LA YESCA”

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

P R E S E N T A:

MAURICIO ERGUETA HURTADO

ASESOR: M.I. ULISES TALONIA VARGAS

OCTUBRE 2014



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la ley Federal del Derecho de autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos y demás material que sea objeto de protección de los derechos del autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la virgen por estar siempre a mi lado, por la fortaleza que me brindaron, para sobrellevar los momentos difíciles en esta etapa de mi vida.

Agradezco a mis papas Oscar y Patty porque además de darme la vida me guiaron, confiaron en mí y me dieron la oportunidad de poder realizar un sueño más en mi vida, agradecerles por apoyarme en mis decisiones y motivarme a seguir adelante en mi vida profesional, por ser un ejemplo de perseverancia y valentía para afrontar los golpes y problemas que nos da la vida. Las palabras sobran para expresar un profundo agradecimiento hacia ustedes, solo queda decirles "Gracias pas, Los amo"

A la Universidad Autónoma de México, por darme las herramientas necesarias en el área de geotecnia.

Al Maestro Ulises Talonia, por su gran amistad, colaboración, paciencia, enseñanza y ayuda en la culminación y desarrollo de este trabajo

A mi hermana Mariana y a mi tío Adalid, por ser un apoyo constante, en un país desconocido.

A mis amigos y compañeros de la especialidad, por hacerme sentir en casa y hacerme sentir parte de una gran familia.

INDICE

I	Lista de símbolos -----	1
II	Introducción -----	2
III	Objetivo -----	4
IV	Justificación -----	5
V	Metodología de trabajo -----	6
1.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCA, FALLA POR CUÑA -----	7
1.1	Definición de la geometría de la cuña -----	9
1.2	Discontinuidades -----	11
1.2.1	Parámetros de las discontinuidades -----	13
1.2.2	Resistencia al corte de los planos de discontinuidad -----	14
1.2.3	Criterio de Barton y Choubey -----	16
1.2.4	Discontinuidades con relleno -----	19
2.	ANÁLISIS DE TALUDES EN ROCA -----	20
2.1	Método analítico (Hoek Y Bray, 1981) -----	20
2.2	Método de John -----	29
2.2.1	Cono de fricción -----	29
2.2.2	Cono de fricción en el caso de una cuña -----	30
2.3	Solución matemática para la estabilidad de un talud en cuña -----	34
2.3.1	Método de análisis -----	35
2.3.2	Programación -----	36
2.3.3	Diagramas de flujo -----	37
3.	CASO PRÁCTICO, TALUD IZQUIERDO DE LA PRESA HIDROELÉCTRICA LA YESCA -----	42
3.1	Geología del sitio -----	45
3.2	Geología estructural -----	48
3.2.1	Fallas -----	48
3.2.2	Sistemas de fracturamiento y estratificación -----	49
3.2.3	Sismicidad -----	51

3.3 Características del macizo rocoso	-----	52
3.3.1 Clasificación geo mecánica del macizo rocoso	-----	53
4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD. APLICACIÓN DEL MÉTODO ANALÍTICO	-----	57
4.1 Análisis de taludes en roca en el margen izquierdo	-----	58
4.1.1 Talud General 1	-----	61
4.1.2 Talud General 2	-----	62
4.1.3 Talud General 3	-----	63
4.1.4 Conclusiones generales de taludes 1-3	-----	65
4.2 Análisis de taludes en roca - falla por cuña (Taludes Generales 1-3)	-----	66
4.2.1 Datos talud general 1	-----	67
4.2.2 Datos talud General 2	-----	70
4.2.3 Datos talud General 3	-----	74
4.2.4 Resumen de Factores de Seguridad taludes 1-3	-----	78
4.3 Análisis del diseño de soporte para taludes (1-3) con fallas	-----	79
4.3.1 Talud General 1 0.75:1 – Planos de fallas LV-S1	-----	80
4.3.2 Talud General 2 0.75:1 – Planos de fallas LV-S1	-----	81
4.3.3 Talud General 3 0.5:1 – Planos de fallas LV-S1	-----	82
4.4 Diseño de tratamientos de soporte	-----	83
4.5 Cambio de posición de la cortina de la P.H. la yesca	-----	84
4.5.1 Talud General 4	-----	86
4.5.2 Talud General 5	-----	87
4.5.3 Talud General 6	-----	88
4.5.4 Talud General 7	-----	89
4.5.5 Talud General 8	-----	90
4.6 Análisis de taludes en roca - falla por cuña (Taludes Generales 4-8)	-----	91
4.6.1 Resumen de Factores de Seguridad para taludes Generales 4-8	-----	92
4.7 Análisis del diseño de soporte para taludes (4-8) con fallas	-----	93
4.7.1 Talud General 5 1:1 – Planos de fallas EST-S3	-----	94
4.7.2 Talud General 7 0.5:1 – Planos de fallas EST-S3	-----	95
4.8 Diseño de tratamientos de soporte para el talud de diseño 2	-----	96

4.9 Sistemas de soporte	97
4.10 Resumen de tablas por elevaciones	98
4.10.1 Talud de diseño 1	98
4.10.2 Talud de diseño 2	100
 CONCLUSIONES	 103
 BIBLIOGRAFÍA	 105
 ANEXOS	 -----

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1

Fotografía 1.1 Representación de una falla en cuña -----	7
Fig. 1.1 Falla en cuña -----	8
Fig. 1.2 Representación estereográfica de bloques en cuña -----	9
Fig. 1.3 Condiciones de una falla en cuña -----	10
Fig.1.4 Relación entre los esfuerzos principales y los esfuerzos en el plano de discontinuidad	15
Fig. 1.5 Modelo de discontinuidad conformada por dientes de ángulo pobre -----	16
Fig. 1.6 Perfiles de rugosidad y el valor atribuido al coeficiente de rugosidad de la discontinuidad JRC -----	18

CAPITULO 2

Fig. 2.1 Condiciones de una falla en cuña -----	20
Fig. 2.2 Medición de ángulos β y ξ en estereografía -----	21
Fig. 2.3 Factor K de una cuña en función de la geometría de la misma -----	22
Fig. 2.4 Geometría de la cuña incluyendo la presión de agua, cohesión y fricción de los planos de deslizamiento -----	23
Fig. 2.5 Estereografía con los datos necesarios para el análisis de estabilidad de la cuña ----	24
Fig. 2.6 Representación del cono de fricción correspondiente a una superficie de deslizamiento ----	30
Fig. 2.7 Cono de fricción aparente con fuerza externa actuando sobre el bloque -----	31
Fig. 2.8 Representación del cono de fricción correspondiente a dos superficies de deslizamiento -----	32
Fig. 2.9 Representación estereográfica para el análisis de taludes en cuña -----	33
Fig. 2.10 Distribución de la presión de agua en un talud en cuña -----	35
Diagrama 1 Diagrama de flujo principal -----	37
Diagrama 2 Diagrama de flujo Programa 1 - Cálculo de estabilidad sin fuerza externa y sin fuerza de anclaje -----	38
Diagrama 3 Diagrama de flujo Programa 2 - Cálculo de estabilidad con fuerza externa y sin fuerza de anclaje -----	39
Diagrama 4 Diagrama de flujo Programa 3 - Cálculo de estabilidad sin fuerza externa y con fuerza de anclaje -----	40
Diagrama 5 Diagrama de flujo Programa 4 - Cálculo de estabilidad con fuerza externa y con fuerza de anclaje -----	41

CAPITULO 3

Fig. 3.1 Talud del izquierdo de la presa la yesca -----	42
Fig. 3.2 Elementos principales en el talud izquierdo de la presa la yesca -----	43
Fig. 3.3 Vista frontal del talud izquierdo de la presa la yesca -----	44
Fig. 3.4 Vista transversal del talud izquierdo de la presa la yesca -----	44
Fig. 3.5 Fallas representativas que cortan el talud de diseño (Azul – Falla Vertedor 1) -----	45
Fig. 3.6 Unidades geológicas a lo largo de la zona del talud de descarga -----	46
Fig. 3.7 Unidad Qta, conformada por conglomerados y clastos bien redondeados -----	47
Fig. 3.8 Estereograma de las familias de discontinuidades de la zona del talud de diseño ---	50
Fig. 3.9 Modelo Geotécnico Secciones 0+000, 0+145 y 0+229 -----	54

CAPITULO 4

Fig. 4.1 Zonificación del talud de diseño -----	57
Fig. 4.2 Columna Geología de la zona del talud diseño -----	58
Fig. 4.3 Talud de diseño junto a la geología del sitio -----	59
Fig. 4.4 Estereografía - Talud General 1 -----	61
Fig. 4.5 Estereografía - Talud General 2 -----	63
Fig. 4.6 Estereografía - Talud General 3 -----	64
Fig. 4.7 Geometría propuesta para el talud de diseño -----	65
Fig. 4.8 Nueva Zonificación del talud de diseño -----	85
Fig. 4.9 Estereografía - Talud General 4 -----	86
Fig. 4.10 Estereografía - Talud General 5 -----	87
Fig. 4.11 Estereografía - Talud General 6 -----	88
Fig. 4.12 Estereografía - Talud General 7 -----	89
Fig. 4.13 Estereografía - Talud General 8 -----	90
Fig. 4.14 Talud de diseño 2 junto a la geología del sitio -----	100

INDICE DE TABLAS

CAPITULO 1

Tabla 1.1 Principales discontinuidades en macizos rocosos -----	12
Tabla 1.2 Métodos de medición de las características de las discontinuidades -----	14
Tabla 1.3 Parámetros resistentes de discontinuidades con rellenos -----	19

CAPITULO 3

Tabla 3.1 Principales fallas en el margen izquierdo de la presa hidroeléctrica la Yesca -----	49
Tabla 3.2 Familias de discontinuidades de la zona del talud de diseño -----	50
Tabla 3.3 Características de las Familias de discontinuidades de la zona del talud de diseño	51
Tabla 3.4 Valores Promedio de la unidad Tmid (Dacita Porfídica) -----	52
Tabla 3.5 Valores Promedio de la unidad Tmird (Dacita Fluidal) -----	53
Tabla 3.6 Parámetros de resistencia de las discontinuidades -----	53
Tabla 3.7 Calidades de roca en las unidades geológicas del talud -----	55
Tabla 3.8 Parámetros de Resistencia de las Unidades del talud de diseño -----	56

CAPITULO 4

Tabla 4.1 Dirección de echados de taludes generales 1-3 -----	57
Tabla 4.2 Factores de seguridad empleados para el análisis de taludes -----	58
Tabla 4.3 Rumbos y echados de los sistemas de fracturamiento existentes -----	60
Tabla 4.4 Fallas en cuña talud general 1 -----	61
Tabla 4.5 Fallas en cuña talud general 2 -----	62
Tabla 4.6 Fallas en cuña talud general 3 -----	63
Tabla 4.7 Parámetros de resistencia de las fallas -----	67
Tabla 4.8 Resumen de los factores de seguridad de taludes -----	78
Tabla 4.9 Taludes con factores de seguridad menores a los requeridos -----	79
Tabla 4.10 Dirección de echados de taludes generales 4-8 -----	85
Tabla 4.11 Fallas en cuña talud general 4 -----	86
Tabla 4.12 Fallas en cuña talud general 5 -----	87
Tabla 4.13 Fallas en cuña talud general 6 -----	88
Tabla 4.14 Fallas en cuña talud general 7 -----	89

Tabla 4.15 Fallas en cuña talud general 8 -----	90
Tabla 4.16 Resumen de los factores de seguridad de taludes -----	92
Tabla 4.17 Taludes con factores de seguridad menores a los requeridos -----	93
Tabla 4.18 Resumen de análisis de estabilidad en taludes de diseño 1 -----	99
Tabla 4.19 Resumen de análisis de estabilidad en taludes de diseño 2 -----	102

Simbología

- α Dirección de echado.
- Ψ Echado o buzamiento.
- C Cohesión.
- ϕ Ángulo de fricción.
- ϕ_r Ángulo de fricción residual.
- FS Factor de seguridad.
- GSI Índice de resistencia geológica.
- JCS Resistencia a la compresión de una pared de roca.
- JRC Coeficiente de rugosidad de la junta.
- m_i Constante de Hoek Brown para la roca intacta.
- m_b Constante de Hoek Brown del macizo rocoso.
- Ri Resultante de las fuerzas sobre los planos.
- RMR Rock Mass Rating de Bieniawski.
- σ_1 Esfuerzo principal mayor.
- σ_3 Esfuerzo principal menor.
- σ_c Resistencia a la compresión uniaxial de la roca.
- σ_n Esfuerzo normal.
- τ Esfuerzo cortante.
- W Peso propio de la cuña.
- Ui Resultante de la presión de agua sobre los planos de discontinuidades.
- V Resultante de la presión de agua sobre la grieta de tensión.
- γ Peso específico de la roca.
- γ_w Peso específico del agua.

Introducción

Cuando se presenta un proyecto de ingeniería pueden presentarse taludes rocosos, ya sean naturales o realizados por el hombre según lo exija el proyecto mediante excavaciones, es en ambos casos que el adecuado diseño del talud o la verificación de la estabilidad del mismo en caso de que sean naturales es de suma importancia para la seguridad de las obras civiles durante su construcción y operación.

Una falla en los taludes puede generar serios daños a las obras civiles, provocando accidentes, retrasos en la construcción u operación, todo esto teniendo consecuencias económicas importantes.

Debido a la importancia económica que conlleva el diseño y verificaciones de los taludes, en diversos proyectos tales como presas, carreteras, puentes, etc, es que se requiere de métodos de estabilidad eficientes y a su vez económicos para realizar el análisis y el diseño de los mismos.

Un análisis de estabilidad de taludes nos permiten:

- Determinar la geometría del talud ya sea artificial o natural.
- Las propiedades de resistencia de los planos de discontinuidad.
- Los métodos de estabilización requeridos (Anclajes, Muros, Sistemas de drenaje,etc)
- La influencia de los parámetros de diseño (Inclinación, altura del talud, dimensiones de las bermas,etc)

Automatizando estos procedimientos evitaremos contratiempos y posibles errores manuales, obteniendo resultados más confiables. La metodología de estabilidad de taludes propuesta en este trabajo se basó en la propuesta hecha por los autores Hoek y Bray, la cual busca definir diseños seguros y funcionales, para que así las obras perseveren en condiciones seguras durante su vida útil.

Los alcances del programa se los presenta serán:

- Aplica los métodos de análisis vectorial y algebraico para el cálculo de las fuerzas.
- El programa considera los siguientes tipos de de falla:
 - o Deslizamiento de la cuña sobre un plano
 - o Deslizamiento de la cuña sobre ambos planos de discontinuidad
 - o Deslizamiento de la cuña sobre ambos planos de discontinuidad y con grieta de tensión
 - o Deslizamiento de la cuña sobre un plano de discontinuidad y con grieta de tensión.

Con el programa se podrá definir el factor de seguridad para el análisis, como la fuerza estabilizadora necesaria según el factor de seguridad mínimo requerido, también se podrá definir la dirección del deslizamiento en caso de que este ocurra,

La validez de los resultados dados por el programa, dependerá de la fidelidad de los parámetros entrada obtenidos en campo como son los datos geológicos y geotécnicos tales como las direcciones de echados y echados de los planos, la cohesión y el ángulo de fricción de los planos de deslizamiento.

Objetivo

El trabajo realizado tiene como objetivo, automatizar los procedimientos de análisis y diseño de taludes en cuña para un macizo rocoso mediante un programa de cómputo, el cual aplica metodologías de equilibrio límite en tres dimensiones, haciendo uso de la técnica de la proyección estereográfica, y con este programa determinar la estabilidad del talud de la ladera izquierda aguas abajo de la presa la Yesca, y proponer los sistemas de estabilidad en caso que sea necesario.

Justificación

Debido a la importancia económica que conlleva el diseño y verificaciones de los taludes, en diversos proyectos tales como presas, carreteras, puentes, etc., es que se requiere de métodos de estabilidad eficientes y a su vez económicos para realizar el análisis y el diseño de los mismos. Por lo que en este trabajo se propone la automatización de procedimientos de análisis de estabilidad de taludes en forma de cuña, para de esta manera poder evitar contratiempos y posibles errores en los cálculos manuales.

.

Metodología de trabajo

Primeramente se creara un programa el cual resuelva fallas en taludes en roca con forma de cuña, este se basará en la metodología de equilibrio límite propuesta por los autores Evert. Hoek y Bray. Mencionado programa se lo realizará con la ayuda del lenguaje de programación Matlab.

La parte práctica del trabajo consistirá en la aplicación del programa realizado sobre el talud de la ladera izquierda de la presa la Yesca. Para de esta manera verificar el buen funcionamiento del programa y proporcionar los tratamientos y recomendaciones necesarias para la estabilidad del talud. Para poder conocer las características geotécnicas del terreno en donde se encuentra la presa la Yesca, nos basamos en el “Informe N° 06-081-SGM/R”, el cual cuenta con condiciones geológicas geotécnicas del sitio que ocupa el talud.

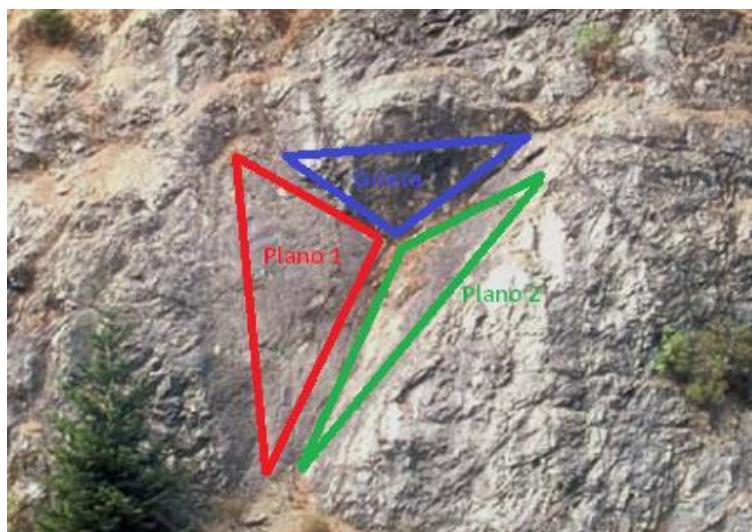


CAPÍTULO I

Capítulo 1

1. Análisis de estabilidad de taludes en roca, Falla por cuña.

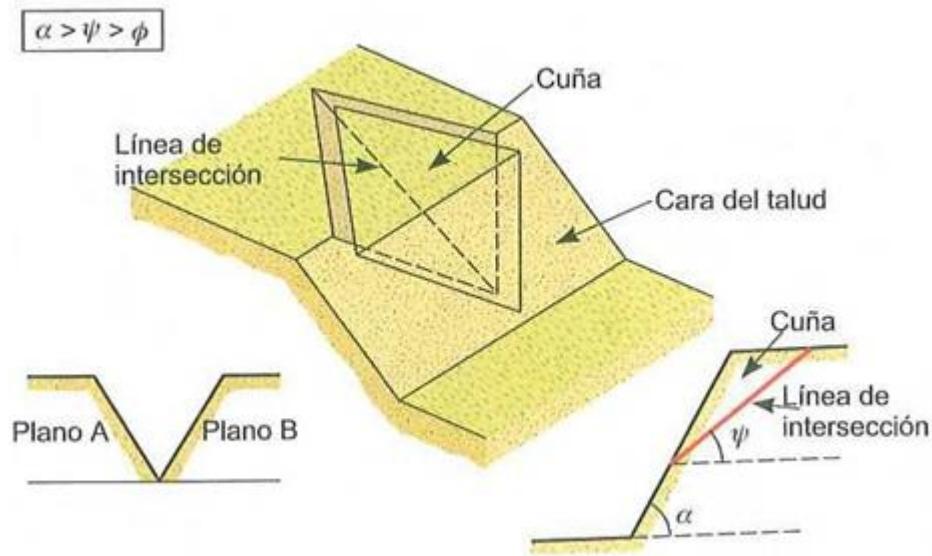
La rotura en cuña es un deslizamiento que se produce en un macizo rocoso, que está controlado por dos o más discontinuidades (Fotografía 1.1), que dispuestas en cierta forma generan la formación de bloques con potencial de salida, estas discontinuidades pueden ser por estratificación, diaclasas, fallas, etc.



Fotografía 1.1 Representación de una falla en cuña
Mostrando los planos de discontinuidades

Para que se llegue a producir este tipo de rotura, los dos planos de discontinuidades deben aflorar en la superficie del talud y se deben de cumplir la siguiente condición: $\alpha > \psi > \phi$, así como se muestra en la figura 1.1, es decir que, para que se produzca el deslizamiento es necesario que la línea de intersección de los planos de discontinuidades, tenga menor inclinación que el plano del talud, también es necesario que los planos de discontinuidades individualicen a la cuña del resto del macizo rocoso.

El coeficiente de seguridad (factor de seguridad) de la cuña viene definido, por el cociente entre las fuerzas resistentes (Fuerzas que se oponen al deslizamiento), y las fuerzas que inducen el deslizamiento, es decir se basa en la interacción de las fuerzas producidas por el peso de la cuña, los empujes del agua, esfuerzos sísmicos, fuerzas externas, fuerzas de anclaje, fuerzas de reacción y fuerzas resistentes (dadas por la Cohesión y Fricción), por lo que para calcular el coeficiente de seguridad (FS) es necesario obtener una resultante sobre cada plano de discontinuidades, para así poder obtener una resultante tangencial de las fuerzas que actúan sobre la línea de caída de la cuña y compararla con las fuerzas resistentes.

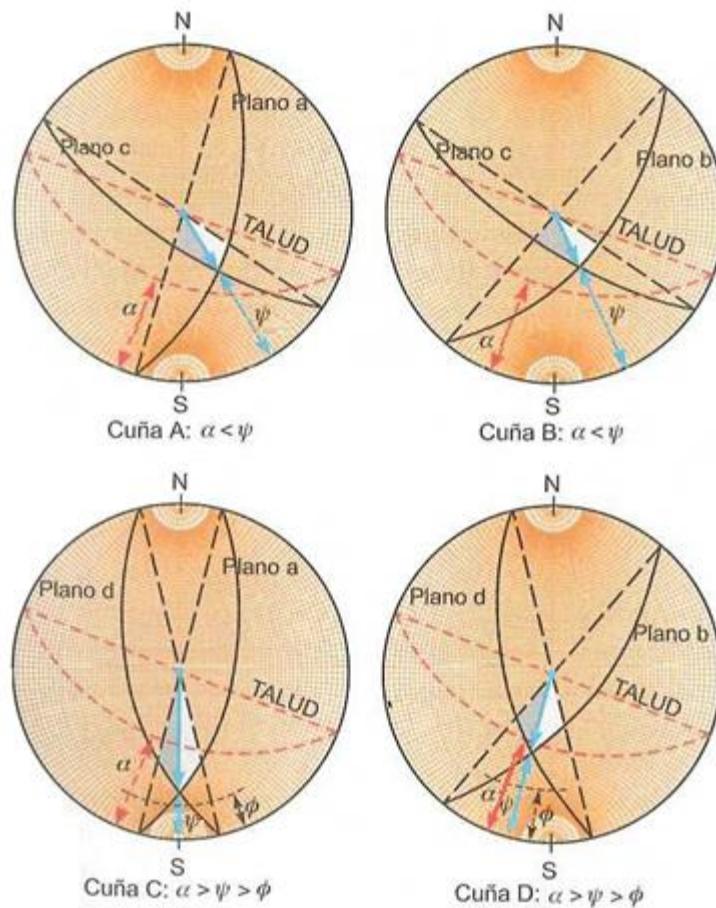
**Fig. 1.1 Falla en cuña****Fuente.-** Ingeniería Geología – González de Vallejo

En una rotura en cuña se desarrolla una componente resistente sobre cada plano de discontinuidad que forma la misma, variando la presión de agua sobre cada uno, al actuar esta independientemente sobre cada plano de discontinuidad, por lo que la solución del problema se complica al convertirse esta en tridimensional.

Para que se produzca el deslizamiento de un bloque en cuña debe de existir dos planos de deslizamiento cuya intersección tendrá que quedar a fuera de la superficie abarcada por el plano del talud en la proyección estereográfica.

En la figura 1.2 se muestra la representación estereográfica de varias familias de discontinuidades y las direcciones de deslizamiento de los bloques en forma de cuña, que se forman para un talud con una inclinación dada. La comparación de los ángulos de inclinación del talud, la línea de intersección de los planos de discontinuidad que forman la cuña, y la fricción que tienen los planos de deslizamiento, nos permiten hacer una primera determinación para saber si el talud es estable o no.

Como se puede apreciar en la figura 1.2, la línea punteada nos representa al talud, el cual tiene una orientación de 110°/45°S, y las líneas de color negro nos representan los planos de discontinuidades. Los taludes A y B no tiene posibilidad de deslizamiento, debido a que no se cumple la condición de que el echado del talud es mayor al echado de la línea de intersección ($\alpha > \psi$), es decir el punto de intersección de los planos A y B queda por dentro del área delimitada por la línea de buzamiento del talud, caso que no sucede con los ejemplos C y D.

**Fig. 1.2** Representación estereográfica de bloques en cuña

Fuente.- Ingeniería Geología – González de Vallejo

1.1 Definición de la geometría de la cuña

La orientación, el espaciado y continuidad de los planos de falla determinan la forma y el volumen de la cuña, la cual se la define en la fig. 1.3, debiéndose de cumplir las siguientes condiciones para que se genere la forma de la misma:

- Los planos de discontinuidades siempre se cruzarán en una línea (Fig. 1.3a). En el estereograma la línea de intersección de los planos estará representada por un punto en que los dos grandes círculos de los planos se cortan, y la orientación de la línea se define por su tendencia (α_i - Rumbo) y su caída (ψ_i) (Fig. 1.3b).
- La dirección de la línea de intersección de los dos planos debe ir en dirección de la cara del talud, el posible rango de tendencia de la misma, variara entre α_1' t α_1 (Fig. 1.3c)

En general el deslizamiento se puede producir si el punto de intersección entre los dos grandes círculos de los planos de deslizamiento se encuentra dentro de la zona sombreada (Fig. 1.3b). Es decir, que por medio de la estereografía, podremos saber si se puede dar o no el deslizamiento del bloque. Sin embargo, el factor de seguridad real, no puede determinarse a partir de la estereografía ya que este depende de los detalles de la geometría de la cuña, la resistencia de cada plano, la presión de agua y las fuerzas externas a las cuales se encuentra expuesto el bloque.

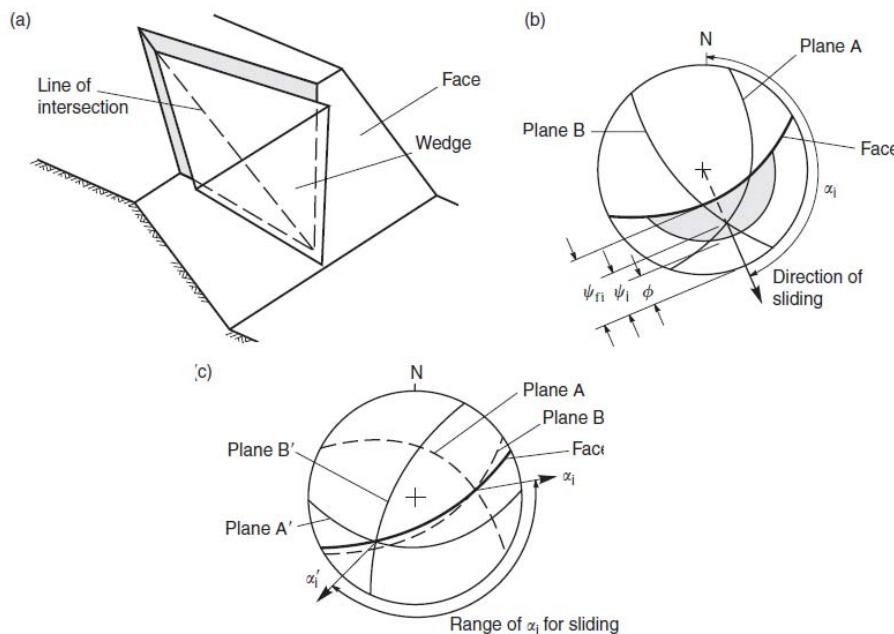


Fig. 1.3 Condiciones de una falla en cuña

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray

El echado y la dirección de echado de la línea de intersección de los dos planos de discontinuidades involucradas están determinados por las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_{AB} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \psi_A \cos \alpha_A - \tan \psi_B \cos \alpha_B}{\tan \psi_A \sin \alpha_A - \tan \psi_B \sin \alpha_B} \right) \text{ ecu. 1.1}$$

$$\psi_{AB} = \tan \psi_A \cos(\alpha_A - \alpha_{AB}) = \tan \psi_B \cos(\alpha_B - \alpha_{AB}) \text{ ecu. 1.2}$$

Dónde:

- α_A Y α_B son las direcciones de echados.
- ψ_A Y ψ_B son los echados de los planos.

1.2 Discontinuidades

Las discontinuidades juegan un papel muy importante en el comportamiento de los macizos rocosos debido a que ellas están presentes en la roca y afectan a la resistencia, permeabilidad y durabilidad del macizo. Es por eso que es importante evaluar tanto la geometría, la naturaleza, el estado y condición de las discontinuidades, pues son ellas las que definen la geometría de los bloques y si los bloques son potencialmente inestables, depende de las características y propiedades de los planos de discontinuidad que el bloque de roca sea estable o no.

Además de la geometría de una discontinuidad y su peso, la influencia en el comportamiento del macizo, exige evaluar los rellenos, la cantidad de agua, las cicatrices y revestimientos en las paredes por materiales solubles, la abertura, rugosidad y persistencia de las discontinuidades, y el número de familias de discontinuidades que se puedan presentar en el macizo.

Las discontinuidades se pueden presentar en taludes, portales de túneles, excavaciones superficiales, en cimentaciones de edificios, entre otros, por lo que en la mayoría de las obras de ingeniería las discontinuidades gobiernan el comportamiento del macizo rocoso donde se asentará o estudiara la obra civil.

Las discontinuidades son importantes no solo porque limitan la resistencia del macizo rocoso, sino también porque controlan las deformaciones y el flujo de agua subterráneas, la mayor parte del flujo de aguas subterráneas ocurre a lo largo de las discontinuidades, excepto en materiales muy porosos con discontinuidades ampliamente espaciadas o cerradas.

Existen diferentes tipos de métodos de análisis de discontinuidades, entre los más comunes tenemos: métodos geofísicos (Sísmica, resistividad), uso de las brújulas (azimutales o rumberas), la construcción del plano o el mapa y la topografía, estos métodos son los más generalizados, pero los métodos anteriormente mencionados no logran recabar datos exactos de las propiedades y características de las discontinuidades, un método más exacto es el de la perforación in-situ, esto cuando hay control de verticalidad y orientación, acompañados estos estudios de una buena descripción de muestras y también existe el método de muestreo en roca expuesta ya sean en la superficie natural del macizo, en excavaciones o trincheras.

El propósito de analizar la existencia de discontinuidades, es el de producir un modelo confiable del patrón de discontinuidades en el macizo rocoso y las características de resistencia de ellas, debido a que es a partir del patrón realizado con todas las discontinuidades predominantes en el macizo que se hará el análisis de estabilidad del

talud, ya que a partir de la orientación de las mismas es que se podrán obtener los posibles modos de fallas.

Las discontinuidades en un macizo rocoso se pueden dar por distintos orígenes y mecanismos, como se muestra en la tabla 1.1.

Origen	Roca	Clase	Mecanismo
Genético	Igneas	Estructura de flujo	Contactos entre coladas de lavas sucesivas
		Estructura de retracción	Grietas de retracción por enfriamiento
	Metamórficas	Foliación	Por gradientes térmicos, de presión y anatexia
	Sedimento	Estratificación	Contactos entre eventos de deposición
Físico-químico	Todas	Termofracturas	Ciclos de calentamiento-enfriamiento o humedecimiento-secado
		Halifracturas	Expansión de sales y arcillas en fracturas
		Gelifracturas	Ciclos de congelamiento y fusión de agua
Gravedad	Todas	Relajación	Pérdida de presión de sepultura y esfuerzos de tracción
		Corte	Concentración de esfuerzos horizontales en valles
Tectónico	Todas	Estructuras de placa	Bordes constructivos, pasivos y destructivos
		Fallas	Rupturas con desplazamientos por esfuerzos de compresión, tracción y corte
		Diáclasas	Rupturas por esfuerzos tectónicos, pero sin desplazamiento de bloques
		Fracturas de pliegues	Radiales en la zona de tracción y de corte en la parte interna de la charnela
Biológico	Todas	Acción de las raíces	Penetración y crecimiento de las raíces de los árboles

Tabla 1.1 Principales discontinuidades en macizos rocosos

Fuente.- Manual de Geología para Ingenieros – Gonzalo Duque Escobar.

1.2.1 Parámetros de las discontinuidades

Las discontinuidades tienen 10 parámetros los cuales pueden ser medidos y estudiados:

- **Orientación.**- Posición espacial de la discontinuidad y se la da con el rumbo y echado de la superficie de la misma. Es importante ver la actitud de los bloques y fracturas para efectos de estabilidad.
- **Espaciamiento.**- Es la distancia perpendicular entre dos discontinuidades de una misma familia. El espaciamiento que se muestra en la superficie de la roca por regla es mayor al real. Por lo que para los datos se toma un espaciamiento promedio.
- **Continuidad.**- Es la longitud de la traza de una discontinuidad en un afloramiento. Cuando hay continuidad en el macizo se garantiza el flujo de agua a través del mismo.
- **Rugosidad.**- Es la ondulación del plano de discontinuidad, la alteración del mismo, ambas propiedades afectan la resistencia del macizo rocoso. Una alta rugosidad aumenta la resistencia a la fricción.
- **Resistencia de las paredes de la discontinuidad.**- Generalmente es la resistencia a la compresión inconfinada, pues es una buena medida de la alteración de las paredes de la discontinuidad. La resistencia aumenta con la presencia de dientes de roca en la discontinuidad.
- **Abertura.**- Es la distancia perpendicular entre las paredes de dos discontinuidades, cuando estas no tienen relleno (sólo agua o aire). Pueden llegar a existir discontinuidades cerradas.
- **Relleno.**- Alude al material entre las paredes de la discontinuidad, por lo general el relleno siempre más blando que el macizo rocoso. Un parámetro en el material de relleno es su grado de cementación.
- **Flujo.**- Se refiere al agua presente en la discontinuidad que se encuentra libre o en movimiento.
- **Número de familias presentes.**- Esta propiedad nos indica el grado de fracturamiento del macizo y depende de la dirección y tipo de esfuerzos. El menor número de familias en un macizo es 3; las familias presentan características distintivas, no solamente en dirección y espaciamiento sino también en condiciones de relleno, caudal e incluso edad y tipo de esfuerzos que la origina.

- **Tamaño de bloques.**- Es una característica importante que afecta a las discontinuidades, debido a que mientras más grandes sean los bloques, mayor será la longitud de los planos de discontinuidad, por lo que deben identificarse los bloques críticos, aquellos que tienen gran tamaño y la posibilidad de desprenderse.

En la tabla 1.2 siguiente se mostrara alguno de los métodos de medición de los parámetros de una discontinuidad.

Parámetros	Método de medición
Orientación	Brújula Geológica
Espaciamiento	Cinta métrica
Continuidad	Cinta métrica
Rugosidad	Esquemas (Rugosímetro) comparados con perfiles de referencia
Resistencia de la pared de la roca	Martillo Schmidt
Abertura	Regla graduada
Relleno	Visual
Flujo	Observaciones cronológicas
Número de familias de discontinuidades	Proyección estereográfica
Tamaño del bloque de la roca	Geometría de las fracturas

Tabla 1.2 Métodos de medición de las características de las discontinuidades

1.2.2 Resistencia al corte de los planos de discontinuidad

La resistencia al corte es un factor fundamental que se debe considerar en el estudio de las propiedades mecánicas de las discontinuidades. Los elementos más importantes que influyen en el comportamiento de las discontinuidades frente a un esfuerzo cortante son:

- Esfuerzos normales al plano de corte
- Rugosidad de las superficies de contacto
- Grado de alteración y resistencia de los labios de la discontinuidad
- Velocidad del movimiento de corte
- Orientación del desplazamiento

En un cilindro como el de la figura 1.4, el cual es sometido a un estado triaxial de esfuerzos, se puede calcular tanto el esfuerzo normal como el cortante sobre el plano de discontinuidad por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos(2\beta) \text{ ecu 1.3}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin(2\beta) \text{ ecu 1.4}$$

σ_1 .- Esfuerzo principal mayor

σ_3 .- Esfuerzo principal menor

β .- Ángulo entre el plano de discontinuidad y el eje principal mayor

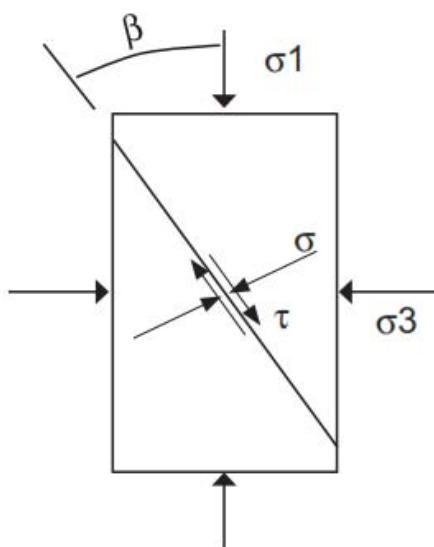


Fig.1.4 Relación entre los esfuerzos principales y los esfuerzos en el plano de discontinuidad

Fuente.- Resistencia al corte en discontinuidades con diferentes Grados de rugosidad - Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 19-1, pp. 55-70.

Existen distintos tipos de planos de discontinuidades tales como:

Discontinuidades planas.- estas son aquellas discontinuidades que no tienen ni rugosidades ni ondulaciones, el ángulo de fricción representa el incremento del esfuerzo de corte debido a la fricción entre las superficies y discontinuidades al aumentar el esfuerzo normal. La resistencia al corte se la calcula con:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\emptyset) \text{ ecu. 1.5}$$

Discontinuidades dentadas.- Son aquellas cuyas superficies están conformadas por dientes triangulares (fig. 1.5) que encajan perfectamente entre sí. Se dan mayormente en

rugosidades que tienen un ángulo de inclinación uniforme (i) y se encuentran en dirección al corte, la resistencia al corte se puede calcular con la siguiente formula:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\emptyset + i) \quad \text{ecu. 1.6}$$

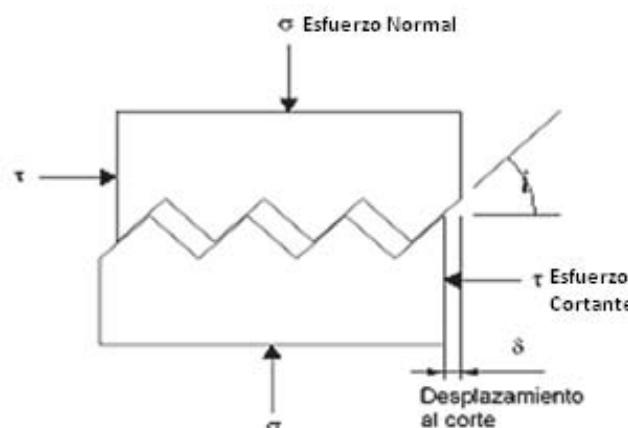


Fig. 1.5.- Modelo de discontinuidad conformada por dientes de ángulo pobre

Fuente.- Resistencia al corte en discontinuidades con diferentes Grados de rugosidad - Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 19-1, pp. 55-70.

1.2.3 Criterio de Barton y Choubey

La superficie de una discontinuidad nunca es suficientemente lisa debido a que presenta ondulaciones y asperezas superficiales, las cuales tienen una influencia importante en la resistencia al corte del macizo rocoso. Este criterio se trata de un criterio empírico, el cual se dedujo a partir del análisis del comportamiento de las discontinuidades realizado en ensayos de laboratorio, este criterio se expresa a través de la ecuación:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \emptyset_r \right] \quad \text{ecu. 1.7}$$

En Donde

JRC.- Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (depende del grado de rugosidad) Fig. 1.6

JCS.- Resistencia a la compresión simple de los labios de la discontinuidad.

τ y σ_n son los esfuerzos tangencial y normal efectivo sobre el plano de discontinuidad.

\emptyset_r es el ángulo de rozamiento residual.

Dependiendo la resistencia de las discontinuidades de tres componentes, una componente fricciónate \emptyset_r , una componente geométrica dada por el parámetro JRC, y una componente de asperidad regida por JCS/σ_n

Con la relación de Barton y Choubey se obtienen ángulos de rozamiento muy altos para tensiones de compresión muy bajas sobre las discontinuidades. Es por ello que no se recomienda su uso para tensiones σ_n tales que $JCS/\sigma_n > 50$, debiendo de tomarse un ángulo de rozamiento constante independiente de la carga, con un valor de ϕ_p igual a:

$$\phi_p = \phi_r + 1.7JRC \text{ ecu. 1.8}$$

Ángulo de rozamiento residual.- En general la pared de la junta esta alterada, por lo que el ángulo de fricción que actúa sobre ella (ϕ_r), será inferior al ángulo de la roca sana ϕ_b . Para la estimación del ángulo de rozamiento residual se aplica la fórmula:

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \frac{r}{R} \text{ ecu. 1.9}$$

R es el valor de rebote del esclerómetro sobre una superficie de material sano y seco, el cual se lo describe en el apartado 6.5 de libro “Ingeniería Geológica – González de Vallejo”, r es el valor del rebote del esclerómetro sobre la superficie en estado natural (húmedo o seco), ϕ_b es el ángulo de fricción de la roca sana.

JCS Resistencia de la pared de la junta.- Este valor se lo puede obtener a partir de los resultados del esclerómetro sobre la pared de la junta mediante la expresión:

$$\log_{10} JCS = 0.00088 \gamma_{roca} r + 1.01 \text{ (kN/m}^3\text{)} \text{ ecu. 1.10}$$

Esta ecuación se la ocupa cuando el material se encuentra alterado, caso contrario se toma el valor de compresión simple de la matriz rocosa σ_c

JRC Coeficiente de rugosidad de la junta.- Valor que depende de la rugosidad de las paredes de la discontinuidad y varía entre 1 – 20, este valor se lo puede obtener a partir de:

- Perfiles de rugosidad estándar (Fig. 1.6)
- A través del ensayo *tilt test*, para el cual se emplean fragmentos de roca o bien testigos de sondeos. Determinando el ángulo $\alpha = \tan(\tau/\sigma_n)$, ángulo a partir del cual se inicia el movimiento de uno de los fragmentos de roca con respecto a los otros. Para este ensayo se aplica la expresión:

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)} \text{ ecu. 1.11}$$

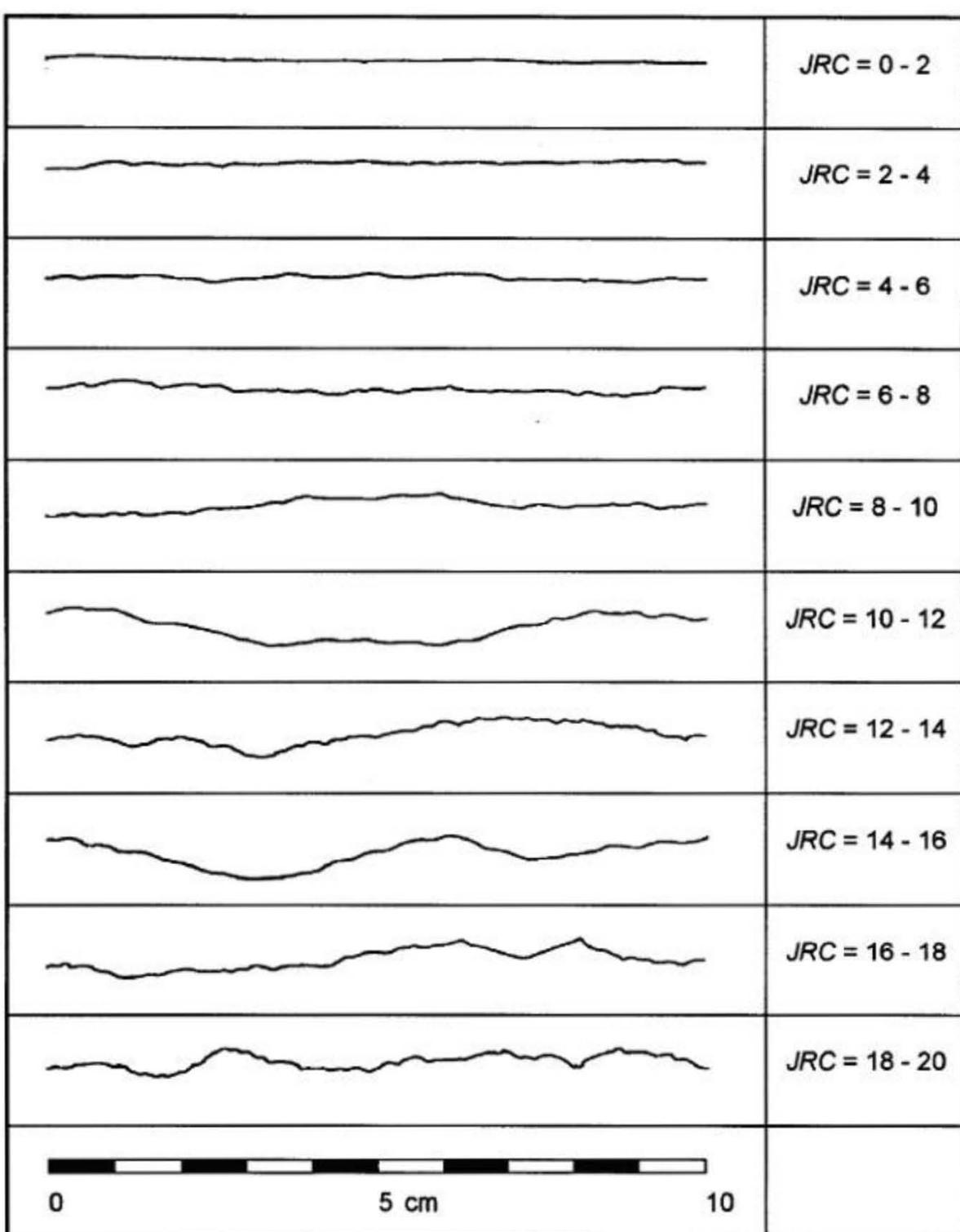


Fig. 1.6.- Perfiles de rugosidad y el valor atribuido al coeficiente de rugosidad de la discontinuidad JRC

Fuente.- Ingeniería Geología – González de Vallejo

1.2.4 Discontinuidades con relleno

En caso de que la junta entre dos planos este rellena por otro material, la resistencia al corte de los planos estará condicionada por su tipo y espesor.

- Si el espesor es muy importante, generalmente la rotura por corte tendrá lugar a través de relleno, y la resistencia del plano de discontinuidad será la del relleno.
- Si el relleno es duro y consolidado, la rotura puede producirse a favor del contacto roca – relleno.

Las propiedades de los rellenos en las juntas controlan el comportamiento de las discontinuidades, rigiendo este comportamiento el tipo de relleno que se tenga, en términos generales puede ser:

- Relleno arcilloso
- Brechas o fragmentos angulares rocosos con mayor o menor proporción de matriz arcillosa
- Materiales cristalizados (calcita, yeso, etc.).

En la tabla 1.3 se presentan parámetros resistentes cohesivos y friccionantes para discontinuidades con rellenos.

Roca	Descripción	Resistencia pico		Resistencia residual	
		Cohesión (kg/cm ²)	Angulo de fricción (°)	Cohesión (kg/cm ²)	Angulo de fricción (°)
Basalto	Brecha arcillosa con fragmentos rocosos	2.4	42		
Caliza	Relleno arcilloso de 6 mm.			0	13
	Id. de 1 a 2 cm.	1	13-14		
	Id. < 1mm.	0.5-2	17-21		
	Marga de 2 cm.	0	25	0	15-24
Diorita	Relleno de arcilla	0	26.5		
Dolomía	Relleno arcilloso de 15 cm de espesor aprox.	0.41	14.5	0.22	17
Esquistos y cuarcitas	Relleno arcillosos 10-15 cm de espesor	0.3-0.8	32		
	Relleno arcilloso fino en planos de estratificación	6.1-7.4	41		
	Relleno arcilloso espeso en planos de estratificación	3.8	31		
Granito	Fallas con rellenos arcillosos	0-1	24-25		
	Fallas con rellenos arenosos	0.5	40		
	Zona de cizalla, granito roto, roca desintegrada y rellenos arcillosos	2.42	42		
Grauvaca	Relleno arcilloso de 1 - 2 mm. en planos de estratificación.			0	21
Lutita	Relleno de arcilla	0.6	32		
	Arcilla en planos de estratificación			0	19.5
Pizarra	Alteradas y laminadas	0.5	33		

Tabla 1.3 - Parámetros resistentes de discontinuidades con rellenos

Fuente.- Ingeniería Geología – González de Vallejo



CAPÍTULO 2

Capítulo 2

2. Análisis de taludes en roca

Para el análisis de estabilidad de la cuña se puede emplear distintos procedimientos, tales como el método analítico, o como el método de John el cual se basa en estereografía y el método numérico.

2.1 Método analítico (Hoek Y Bray, 1981)

Este método tiene la desventaja de ser complicado y laborioso de resolver, asumiendo que al deslizamiento del bloque, solo se le opone la fuerza ejercida por la fricción de los planos, el coeficiente de seguridad se lo obtiene de la siguiente manera:

$$FS = \frac{(R_A + R_B) \tan \phi}{W \sin \psi_i} \text{ ecu. 2.1}$$

Siendo ψ_i el echado de la línea de intersección del plano A y B con la horizontal, R_A y R_B son las reacciones normales a los planos de falla, y W es peso del bloque el cual actúa sobre la línea de intersección de ambos planos, pudiéndose observar en la Fig. 2.1

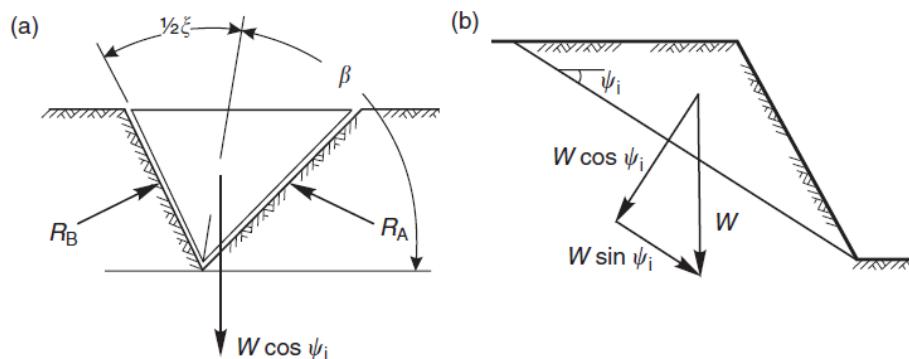


Fig. 2.1 Condiciones de una falla en cuña

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray

Las reacciones normales a los planos de fallas R_A y R_B , se las calcula de la siguiente manera:

$$R_A \sin \left(\beta - \frac{1}{2} \xi \right) = R_B \sin \left(\beta + \frac{1}{2} \xi \right) \text{ ecu. 2.2}$$

$$R_A \cos \left(\beta - \frac{1}{2} \xi \right) + R_B \cos \left(180^\circ - \beta - \frac{1}{2} \xi \right) = W \cos \alpha \text{ ecu. 2.3}$$

Donde β y ξ se definen en la figura 2.1, estos se miden atreves de estereografía, en un gran círculo que contiene el polo de la línea de intersección y los polos de los dos planos de deslizamiento (Fig. 2.2). Con el fin de satisfacer las condiciones de equilibrio, las

componentes normales de las reacciones son iguales (ecu. 2.2) y la suma de las componentes paralelas es igual a la componente del peso que actúa por la línea de intersección (ecu.2.3).

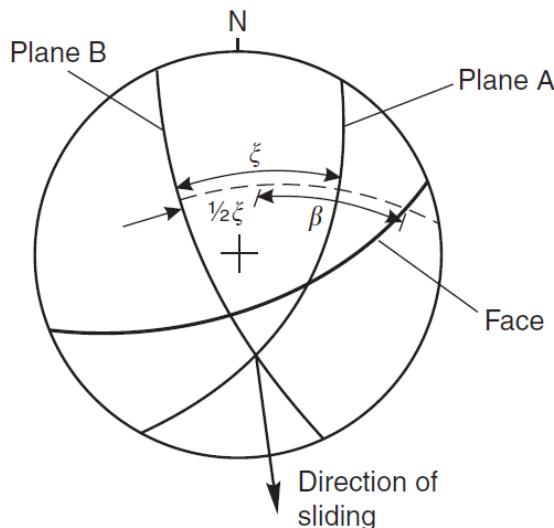


Fig. 2.2 Medición de ángulos β y ξ en estereografía

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray

Despejando las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$R_A + R_B = \frac{W \cos \alpha \sin \beta}{\sin \frac{1}{2} \xi} \quad \text{ecu. 2.4}$$

$$FS = \frac{\sin \beta}{\sin \frac{1}{2} \xi} \frac{\tan \phi}{\tan \psi_i} \quad \text{ecu. 2.5}$$

También se puede obtener el factor de seguridad mediante la siguiente expresión:

$$FS_W = K FS_P \quad \text{ecu. 2.6}$$

Donde FS_W es el factor de seguridad de una cuña soportada sólo por la fricción ejercida por los planos, FS_P es el factor de seguridad, en el cual el ángulo de fricción (ϕ) del plano de deslizamiento, es el mismo ángulo que el echado de la línea de intersección ψ_i .

K es el factor de cuña que, como se muestra por la ecuación 2.5, depende del ángulo ξ y el ángulo de inclinación β de la cuña. Los valores para el factor K de cuña, para una rango de valores de ξ y β se obtienen gráficamente en la Figura 2.3.

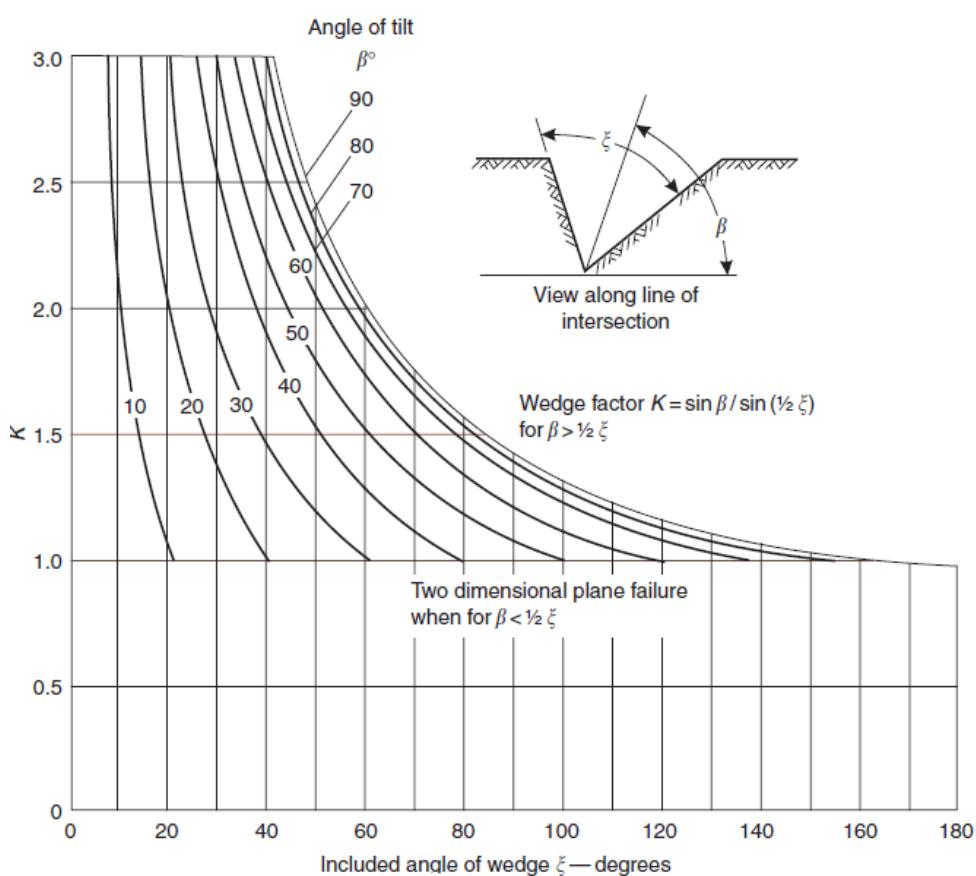


Fig. 2.3 Factor K de una cuña en función de la geometría de la misma

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray

El método de cálculo del factor de seguridad de cuñas explicado no incorpora diferentes ángulos de fricción y cohesiones en los dos planos de deslizamiento, ni presiones de agua o suelo. Cuando estos factores se incluyen en el análisis, las ecuaciones se vuelven más complejas. Debido a que las ecuaciones están en términos de los ángulos ξ y β , ángulos que no se pueden medir directamente en el campo. De igual manera este análisis cinemático proporciona información limitada del factor de seguridad.

Cuando se quiere incluir en el cálculo del factor de seguridad diferentes cohesiones en los planos de deslizamiento y una presión de agua, las ecuaciones para este análisis son más complicadas y no se utilizarían las anteriormente mencionadas, como también la limitación del método es que no nos sirve cuando la cuña tendrá una grieta de tensión o cuando se le quiere aplicar una fuerza de anclaje o una fuerza externa. En lugar de desarrollar las ecuaciones en términos de los ángulos ξ y β , que no se pueden medir directamente en el campo, el análisis se presentaría en términos de echados y direcciones de echados medidos en campo.

La altura total de la pendiente H es la diferencia de la elevación vertical entre las extremidades superiores e inferiores de la línea de intersección a lo largo de la cual se supone que se produzca deslizamiento. La distribución de la presión de agua se basa en la hipótesis de que la propia cuña es impermeable y que el agua entra en la parte superior de la cuña a lo largo de líneas de intersección 3 y 4 y las fugas de la cara inclinada a lo largo de líneas de intersección 1 y 2. La distribución de la presión resultante se muestra en la figura 2.4. La presión máxima de agua a lo largo de la línea de intersección 5 y siendo la presión cero a lo largo de las líneas 1, 2, 3 y 4. Esta es una distribución de presión triangular con un valor máximo que se encontrara a $1/2H$.

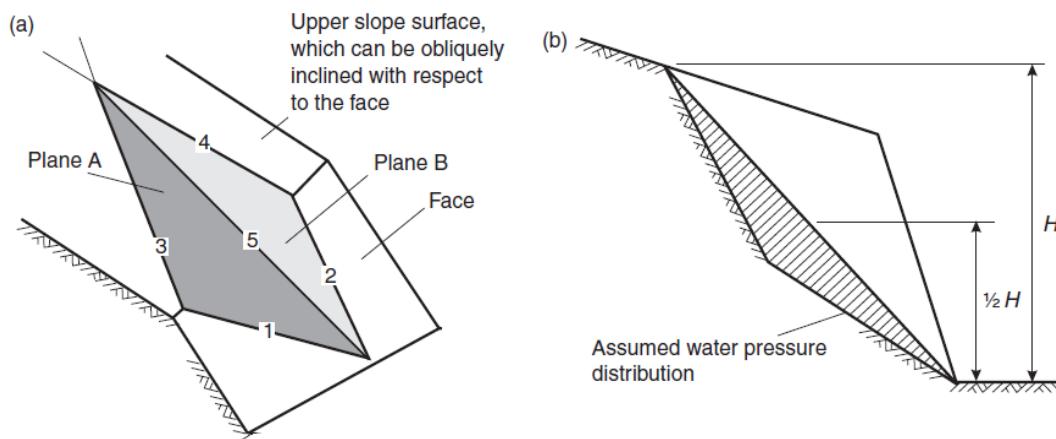


Fig. 2.4 Geometría de la cuña incluyendo la presión de agua, cohesión y fricción de los planos de deslizamiento **Fuente.**- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray

Los planos en donde se produce el deslizamiento son los planos A y B, y la numeración del 1 al 5 son las líneas de intersección entre los planos como se muestra en la figura.

Normalmente el deslizamiento de la cuña siempre se da por la línea de intersección de los planos A y B, por lo que el factor de seguridad está dado por:

$$FS = \frac{3}{\gamma H} (C_A X + C_B Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} X \right) \tan \phi_A + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} Y \right) \tan \phi_B \text{ ecu. 2.7}$$

Dónde:

- C_A y C_B son las cohesiones de los planos de deslizamiento.
- ϕ_A y ϕ_B son los ángulos de fricción de los planos de deslizamiento.
- γ es el peso específico de la roca.
- γ_w el peso específico del agua.
- X, Y, A y B , son factores de dimensión que dependen de la geometría de la cuña y están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$X = \frac{\operatorname{sen} \theta_{24}}{\operatorname{sen} \theta_{35} \operatorname{sen} \theta_{2na}} \text{ ecu. 2.8}$$

$$Y = \frac{\operatorname{sen} \theta_{13}}{\operatorname{sen} \theta_{35} \operatorname{sen} \theta_{1nb}} \text{ ecu. 2.9}$$

$$A = \frac{\cos \psi_a - (\cos \psi_b \cos \theta_{na.nb})}{\operatorname{sen} \psi_5 \operatorname{sen}^2 \theta_{na.nb}} \text{ ecu. 2.10}$$

$$B = \frac{\cos \psi_b - (\cos \psi_a \cos \theta_{na.nb})}{\operatorname{sen} \psi_5 \operatorname{sen}^2 \theta_{na.nb}} \text{ ecu. 2.11}$$

Dónde:

- ψ_A Y ψ_B son los echados de los planos de deslizamiento.
- ψ_5 es el echado de la línea de intersección entre el plano A y B.
- θ_i se los representa en la figura 2.5.

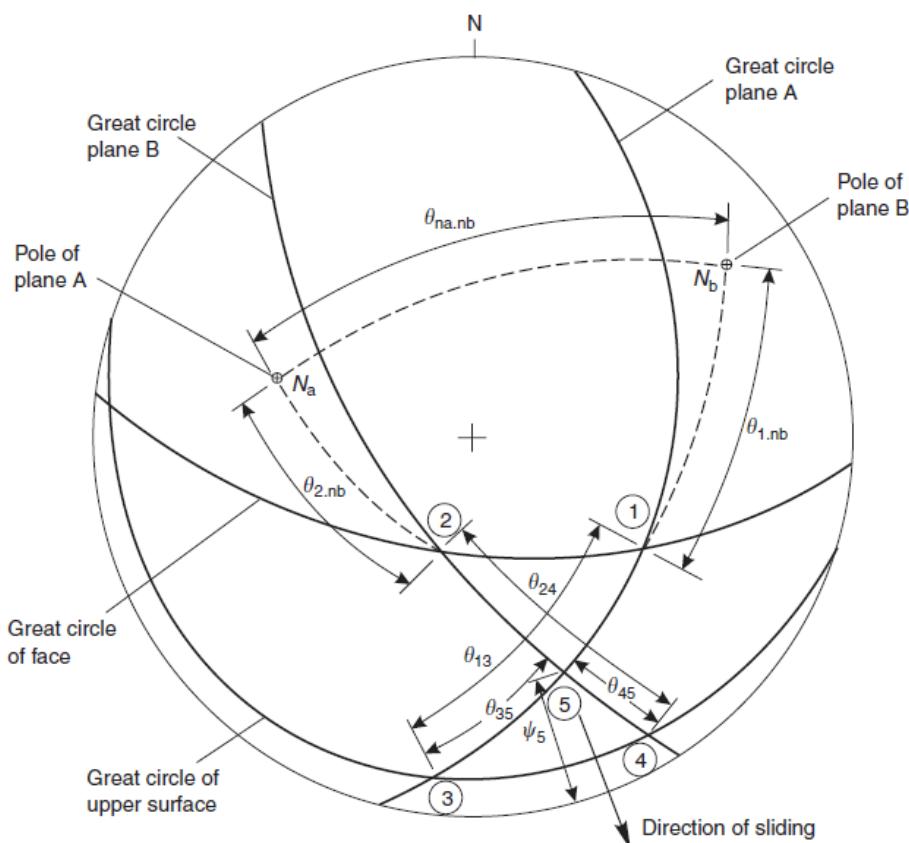
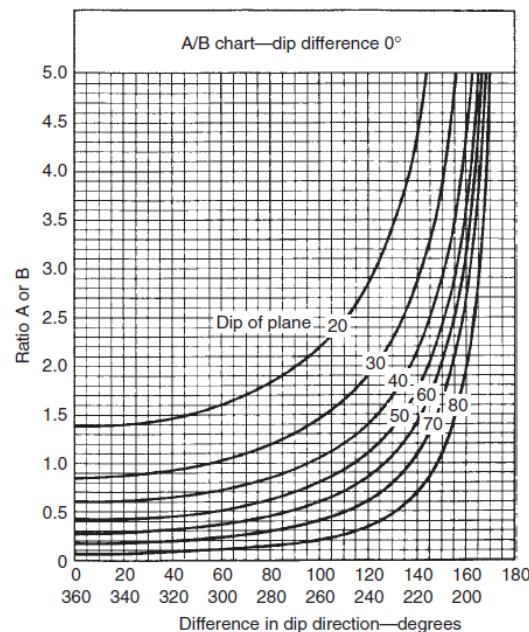


Fig. 2.5 Estereografía con los datos necesarios para el análisis de estabilidad de la cuña
Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray

Para el caso donde una cuña se encuentra formada por planos sin cohesión y sin presencia de agua, la ecuación se reduce a:

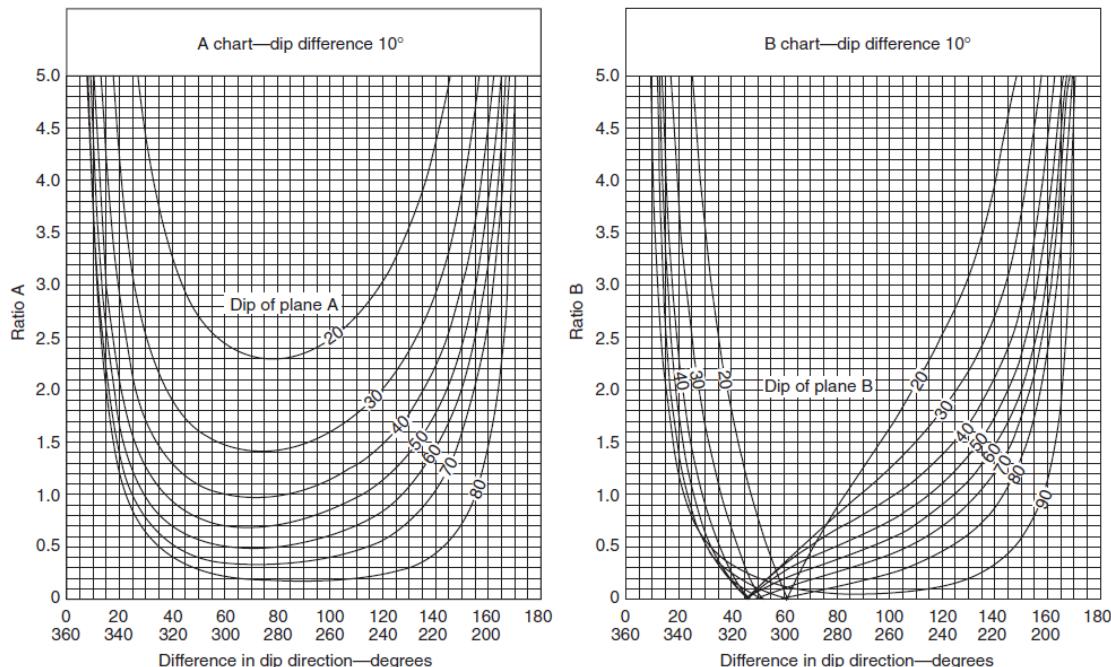
$$FS = A \tan \theta_A + B \tan \theta_B \text{ ecu. 2.12}$$

Los parámetros A y B los proporcionan los siguientes ábacos: consultados de la bibliografía “Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray pg. 162 – 169” siendo el plano A el de menor buzamiento, Este método es rápido y útil para realizar análisis estimativo de la estabilidad de las cuñas en fases de diseño de los taludes.



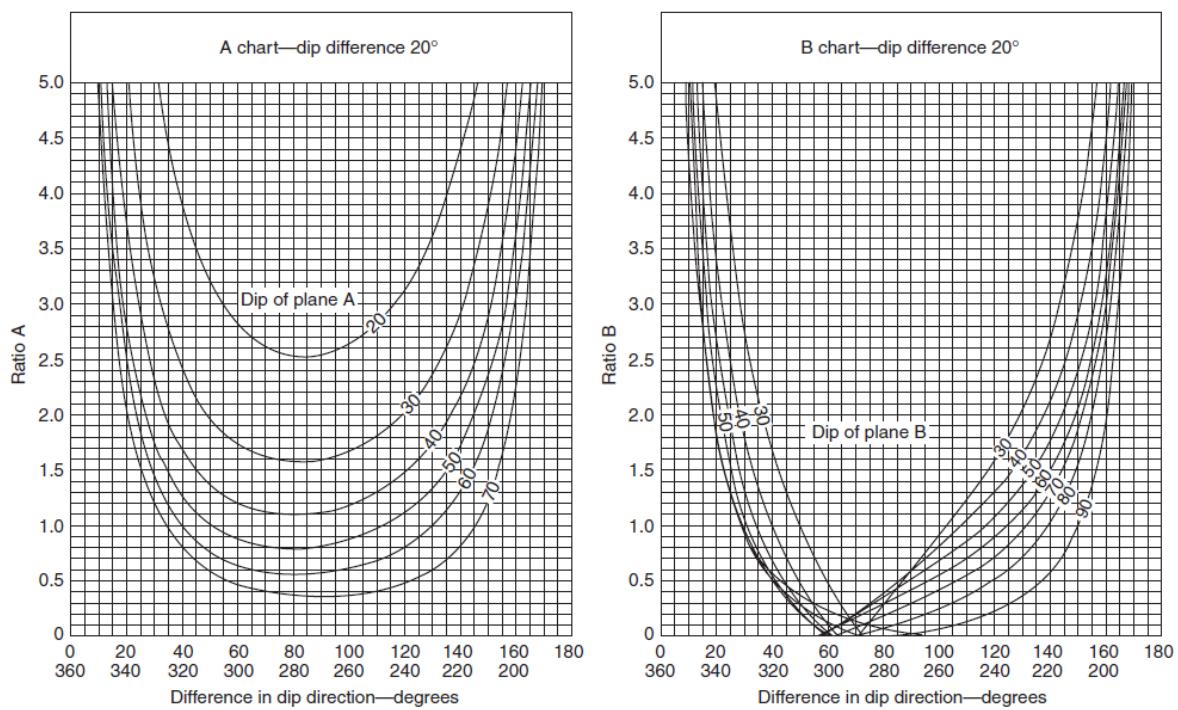
Ábaco 1.- Grafica de estabilidad solo por fricción, 0° de diferencia entre echados de A y B.

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray



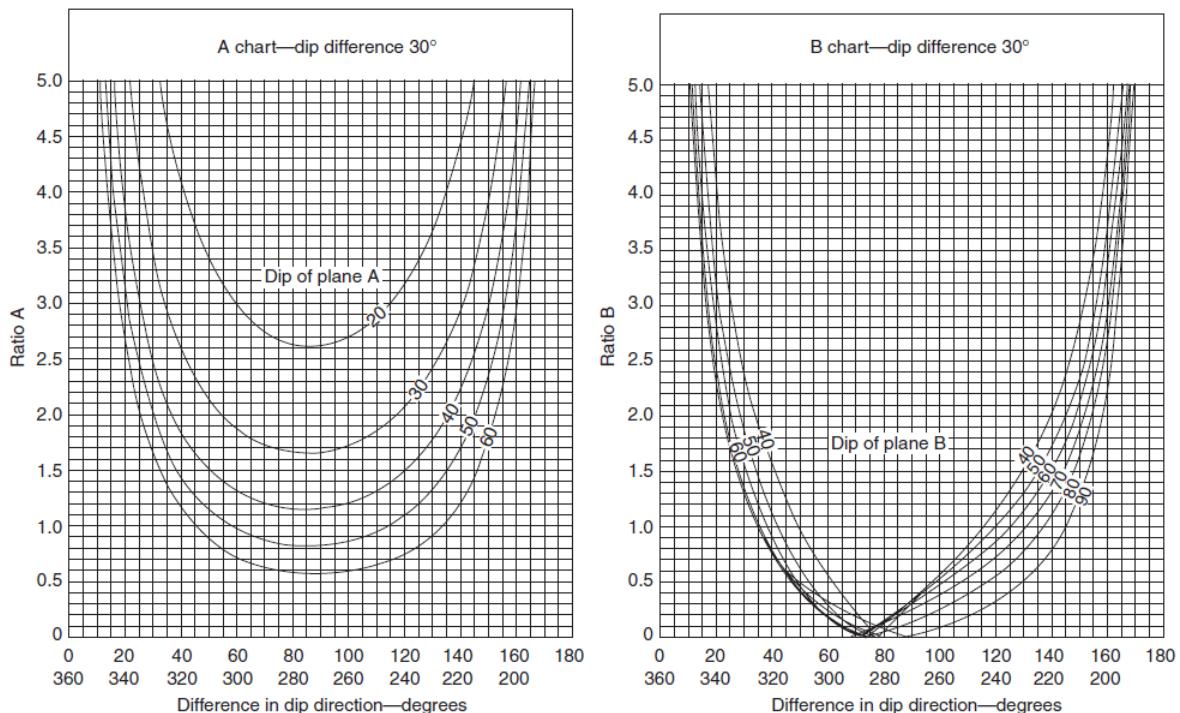
Ábaco 2 Grafica de estabilidad solo por fricción, 10° de diferencia entre echados de A y B.

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray



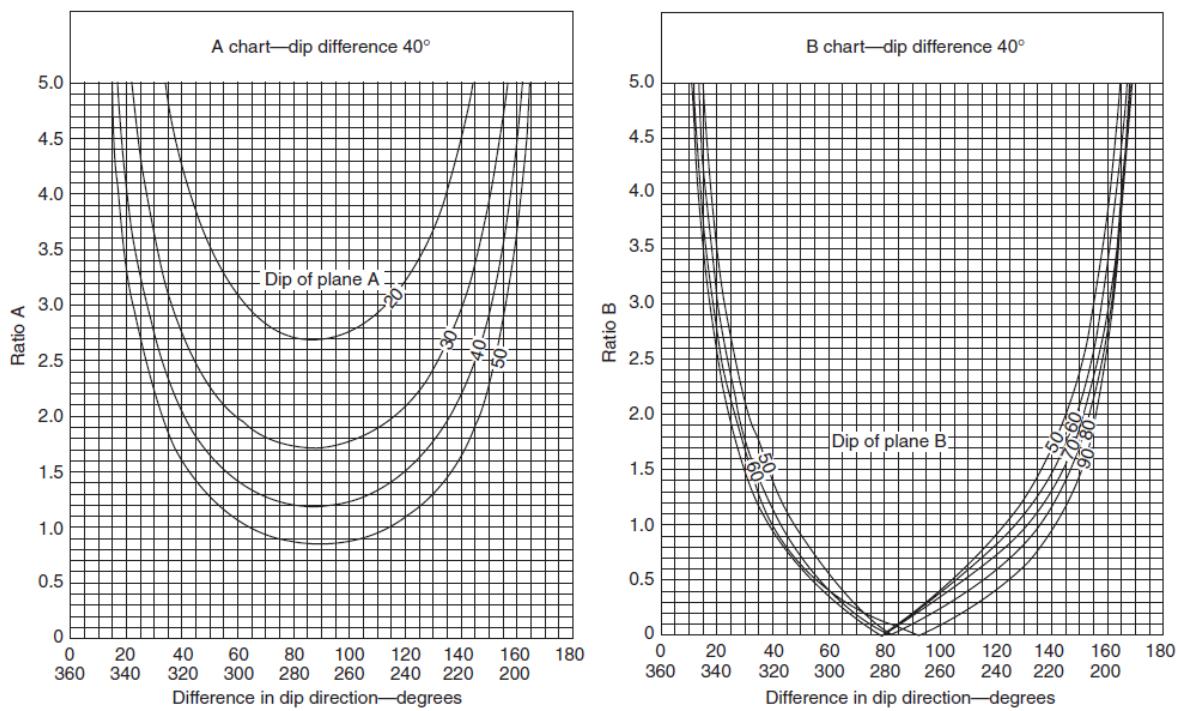
Ábaco 3 Grafica de estabilidad solo por fricción, 20° de diferencia entre echados de A y B.

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray



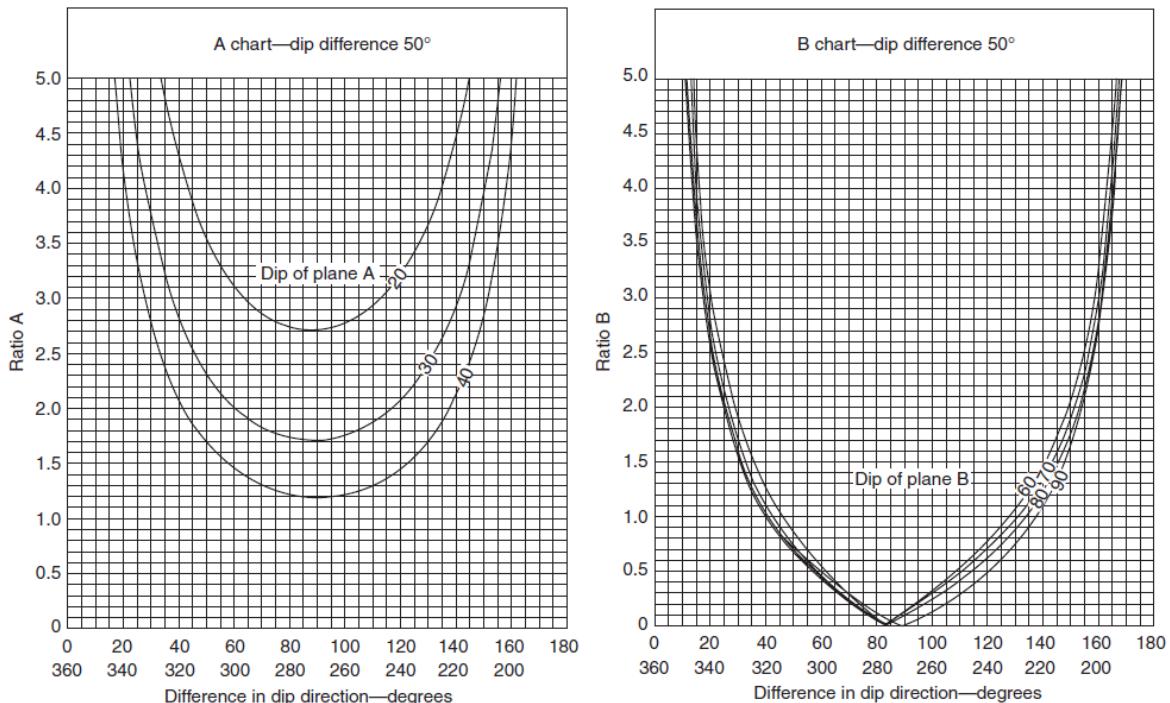
Ábaco 4 Grafica de estabilidad solo por fricción, 30° de diferencia entre echados de A y B.

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray



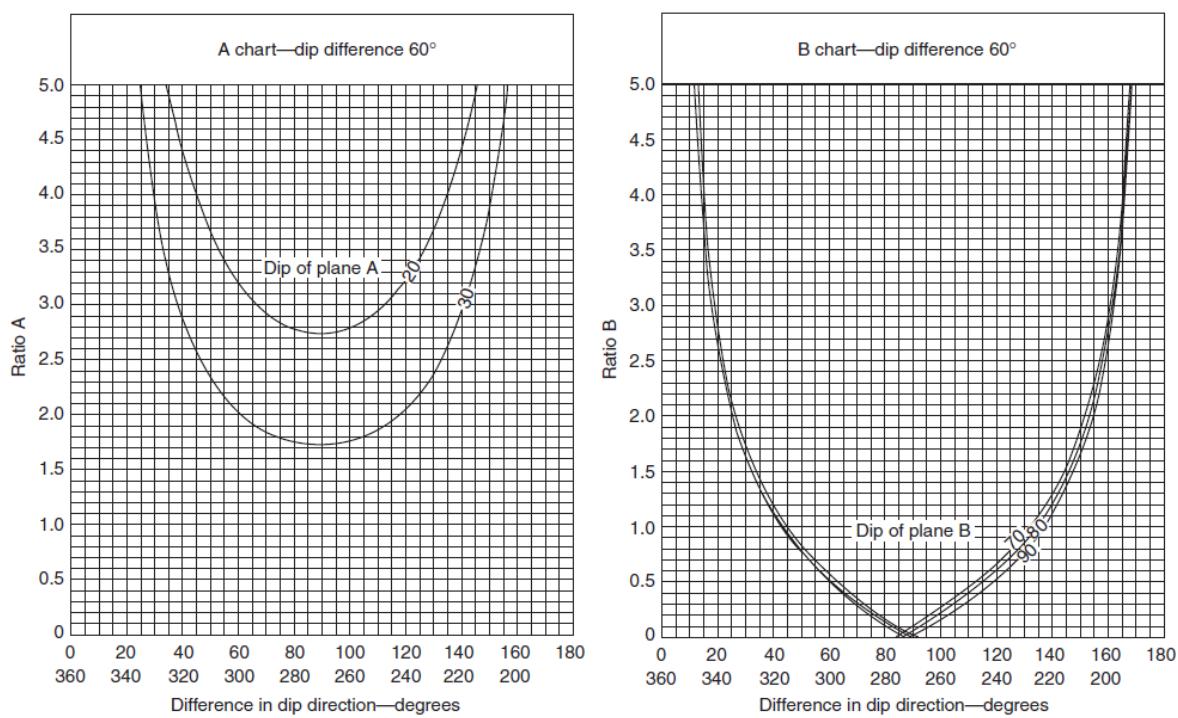
Ábaco 5 Grafica de estabilidad solo por fricción, 40° de diferencia entre echados de A y B.

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray



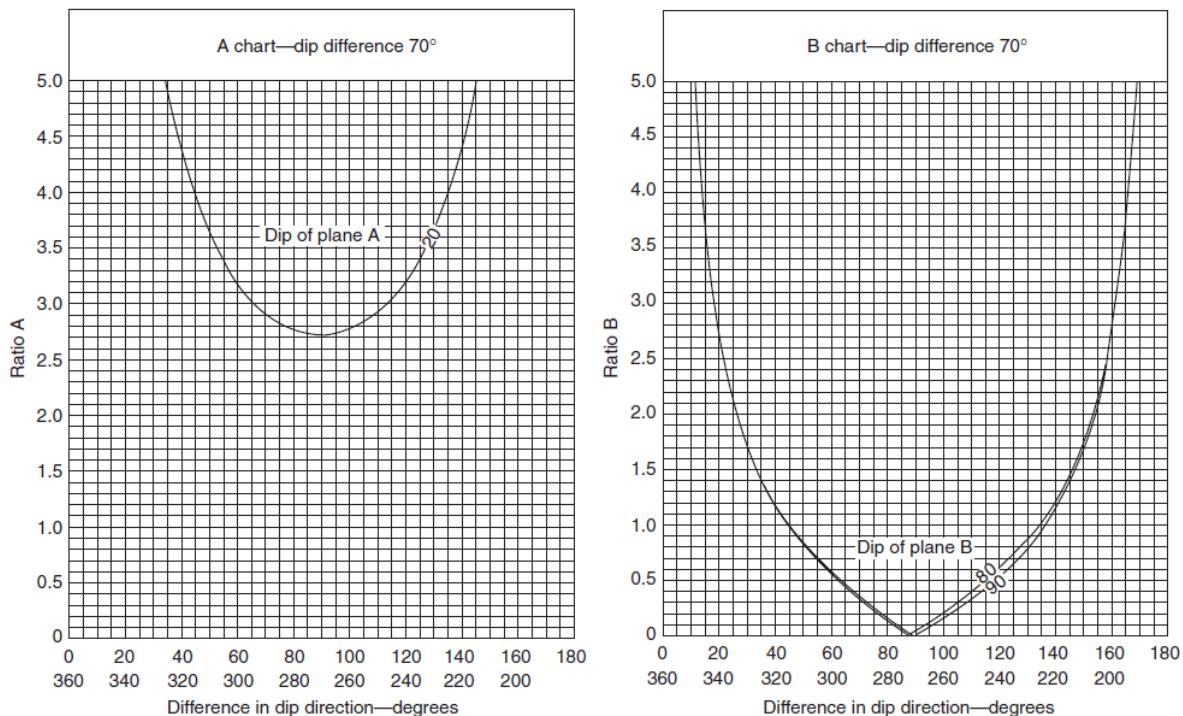
Ábaco 6 Grafica de estabilidad solo por fricción. 50° de diferencia entre echados de A y B.

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray



Ábaco 7 Grafica de estabilidad solo por fricción. 60° de diferencia entre echados de A y B.

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray



Ábaco 8 Grafica de estabilidad solo por fricción. 70° de diferencia entre echados de A y B.

Fuente.- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John W. Bray

2.2 Método de John.

El método de John se basa en la representación estereográfica de las direcciones de las fuerzas actuantes, y los planos que forman la cuña, esto con la finalidad de conocer los ángulos entre las diferentes fuerzas resultantes que permitirán calcular el factor de seguridad que tendrá el talud en cuña. A continuación se mencionarán algunos conceptos de importancia para el desarrollo del mismo.

2.2.1 Cono de fricción

El cono de fricción es fundamental a la hora de determinar mediante técnicas estereográficas la fuerza de fricción que se opondrá de un bloque. El peso del bloque (W) se descompondrá en dos fuerzas normales y tangenciales al plano de deslizamiento:

$$N = W \cos \psi \quad \text{ecu. 2.13}$$

$$S = W \operatorname{sen} \psi \quad \text{ecu. 2.14}$$

Si el plano de deslizamiento no tiene una cohesión, la fuerza que se opondrá al deslizamiento del bloque será R_ϕ , y el movimiento del bloque tendrá lugar cuando $S > R_\phi$. Es decir cuando $\psi > \phi$; por lo que el coeficiente de seguridad vendrá dado por la ecuación 2.16 ó 2.17.

Donde

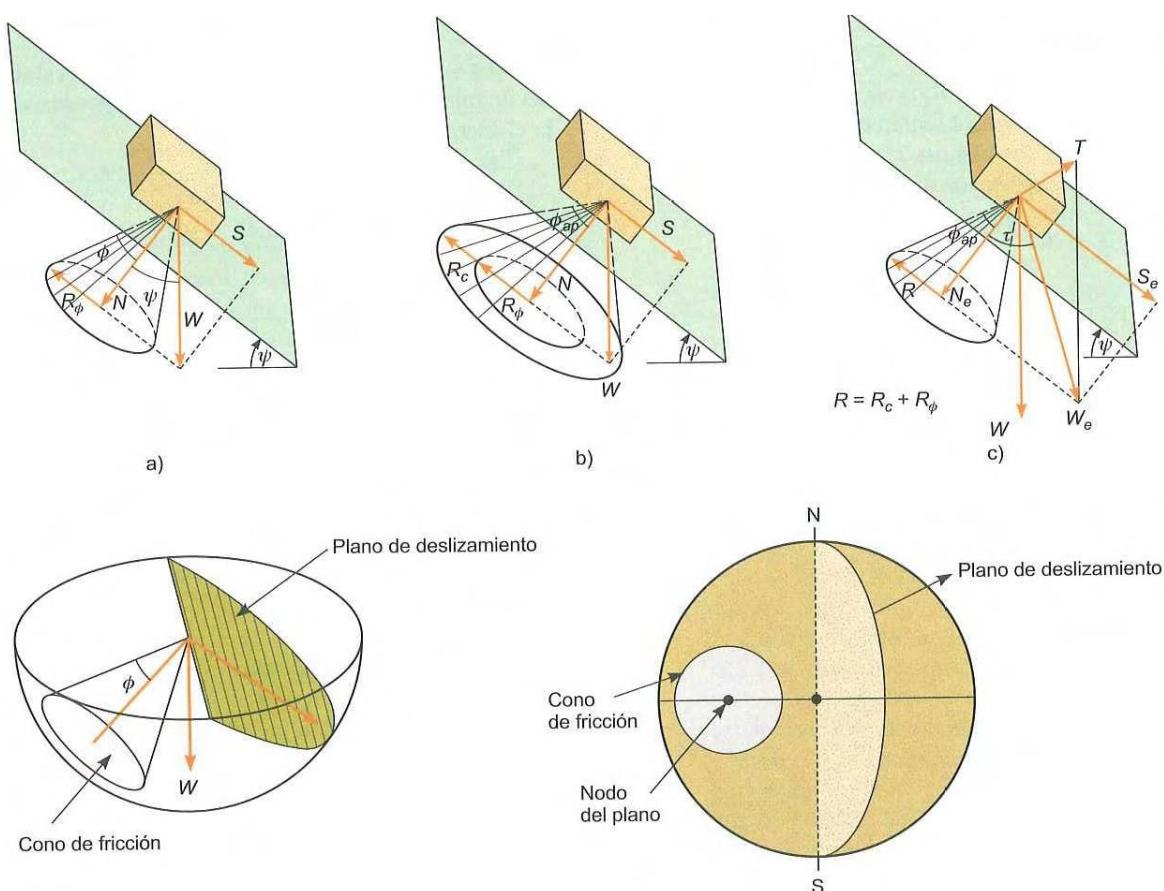
- ϕ Ángulo de fricción del plano de deslizamiento.
- ψ Echado del plano.
- R_ϕ Fuerza resistente que ejerce el plano de deslizamiento
- S fuerza actuante sobre el plano de deslizamiento
- N Fuerza normal del bloque de deslizamiento.

$$R_\phi = \frac{N \tan \phi}{\tan \psi} \quad \text{ecu. 2.15}$$

$$FS = \frac{R_\phi}{S} = \frac{W \cos \phi \tan \phi}{W \operatorname{sen} \psi} \quad \text{ecu. 2.16}$$

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \psi} \quad \text{ecu. 2.17}$$

La fuerza resistente R_ϕ es uniforme sobre la superficie de deslizamiento, y si la fuerza de fricción es uniforme se podrá construir un “Cono de fricción”, este se construirá alrededor de la fuerza normal N como se muestra en la figura 2.6, cuya base es un círculo de radio R_ϕ y su altura es N , la condición para que deslice el bloque es que $\psi > \phi$, y se cumple cuando el vector W cae fuera del cono de fricción, esto se lo puede observar en la figura 2.6.

**Fig. 2.6** Representación del cono de fricción correspondiente a una superficie de deslizamiento

Fuente.- Ingeniería Geología – González de Vallejo

Cuando tengamos “cohesión” en el plano de deslizamiento, esta propiedad se la tomara en cuenta mediante el denominado ángulo de fricción aparente, que es mayor que el ángulo de fricción del plano de deslizamiento, la fuerza de fricción aparente asociada a este ángulo es igual a la fuerza de fricción mas la fuerza de cohesión, por lo que la fuerza resistente estará expresada por R_c .

La fuerza resistente total que actuara ante el deslizamiento será la suma de ambas R_ϕ y R_c , formando de esta manera un nuevo cono de fricción al cual se le llamará “cono de fricción aparente” (fig 2.6). El ángulo de fricción aparente \emptyset_{ap} se lo calculará:

$$\tan \emptyset_{ap} = \frac{(R_\phi + R_c)}{N} = \tan \emptyset + \frac{cA}{W \cos \alpha \psi} \quad \text{ecu. 2.18}$$

Y el coeficiente de seguridad se lo calculará:

$$FS = \frac{R_\phi + R_c}{S} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi_{ap}}{W \sin \alpha \psi} \quad \text{ecu. 2.19}$$

$$FS = \frac{\tan \phi_{ap}}{\tan \psi} \quad \text{ecu. 2.20}$$

Siendo A el área de la base del bloque, la condición para que ocurra el deslizamiento en estas condiciones será: $S > R_\phi + R_c$ ó $\psi > \phi_{ap}$.

Cuando se considere la aplicación de una fuerza externa sobre el bloque de deslizamiento, se tendrá que calcular la resultante W_e entre el peso W y la fuerza externa T (Fig.2.7), con dicha resultante el factor de seguridad se lo calculará al igual que en los casos anteriores, según la resultante caiga dentro o fuera del cono de fricción se definirá si el talud es estable o no.

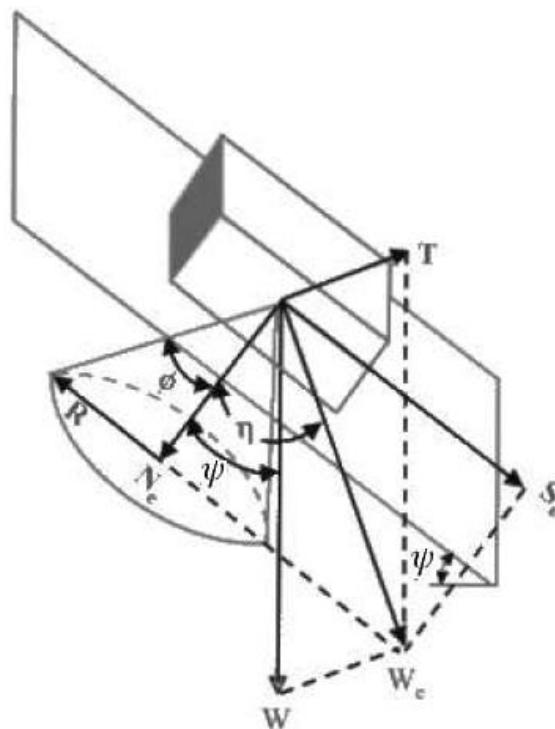


Fig. 2.7 Cono de fricción aparente con fuerza externa actuando sobre el bloque

Fuente.- Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes – Pedro Ramírez Oyanguren

2.2.2 Cono de fricción en el caso de una cuña

Cuando existen dos planos de discontinuidades se puede llegar a formar un talud en cuña, de la cual su principal característica es que su deslizamiento no tiene lugar sobre un solo plano, si no que el deslizamiento se produce sobre dos planos. Para un bloque en cuña se considerarán los ángulos de fricción de ambos planos de deslizamiento, siendo estos ϕ_A y

ϕ_B (Fig 2.8), La condición de deslizamiento en el caso de una cuña depende del ángulo de fricción aparente ϕ_i que actúa en un plano vertical paralelo a la línea de intersección de los planos A y B.

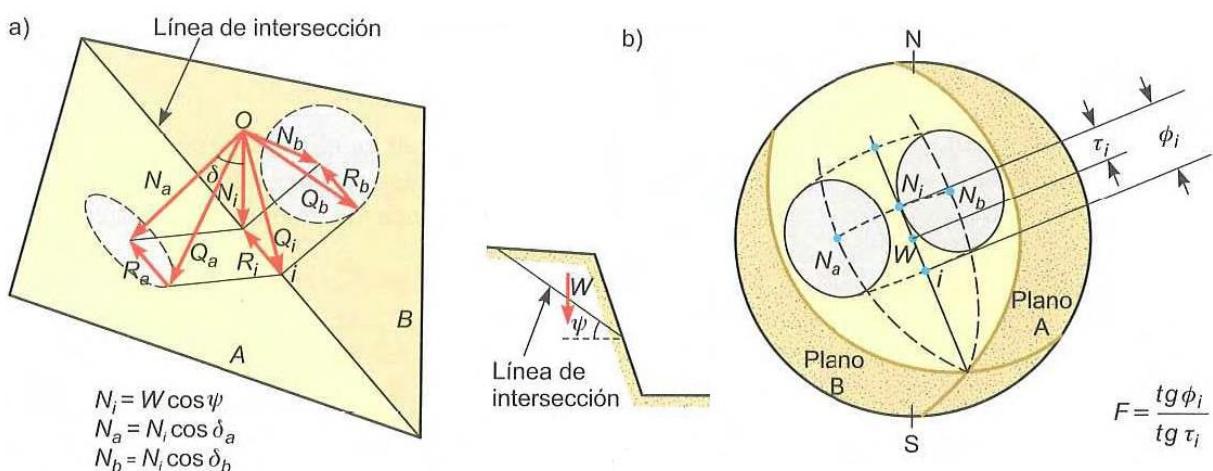


Fig. 2.8 Representación del cono de fricción correspondiente a dos superficies de deslizamiento (talud en cuña)

Fuente.- Ingeniería Geología – González de Vallejo

Como se muestra en la figura 2.8a, la fuerza normal ejercida sobre los planos deslizamiento Na y Nb se descompondrán en dos fuerzas Q_a , Q_b y R_a , R_b (fuerzas que actúan paralelas a la línea de intersección de ambos planos).

En caso de que la cohesión sea nula R_a y R_b representan los radios de la base de los conos de fricción de la cuña sobre los planos A y B respectivamente.

Las fuerzas Q_a y Q_b , se pueden componer en una sola fuerza que actué sobre la línea de intersección de ambos planos, dando lugar a la resultante Q_i , de igual manera que las fuerzas N_a y N_b darán la resultante N_i .

En estereografía los vectores formados sobre la línea de intersección de la cuña (fig. 2.8b) N_i y Q_i representarán la fuerza resistente R y la fuerza actuante S estará dada por el vector $W - N_i$, siendo el factor de seguridad la relación entre las magnitudes de estos dos vectores, o la relación entre las tangentes de los ángulos ϕ_i ($N_i - Q_i$) y τ_i ($N_i - W$)

$$FS = \frac{\tan \phi_i}{\tan \tau_i} \text{ ecu. 2.21}$$

Los datos necesarios para obtener el FS de un bloque en cuña son:

- Dirección y echado de los planos de discontinuidades.
- Áreas de los planos A y B.

- Peso del bloque a deslizar.
- Valores de \emptyset y C , para ambos planos
- Presión ejercida por el agua en ambos planos.

En el caso de que no exista cohesión en ambos planos de la cuña los conos de fricción formados tendrán un radio igual al ángulo de fricción, no existiendo un ángulo de fricción aparente como sería el caso de la existencia de la cohesión.

Los pasos a seguir para el análisis del factor de seguridad de una cuña por medio de la estereografía son los siguientes:

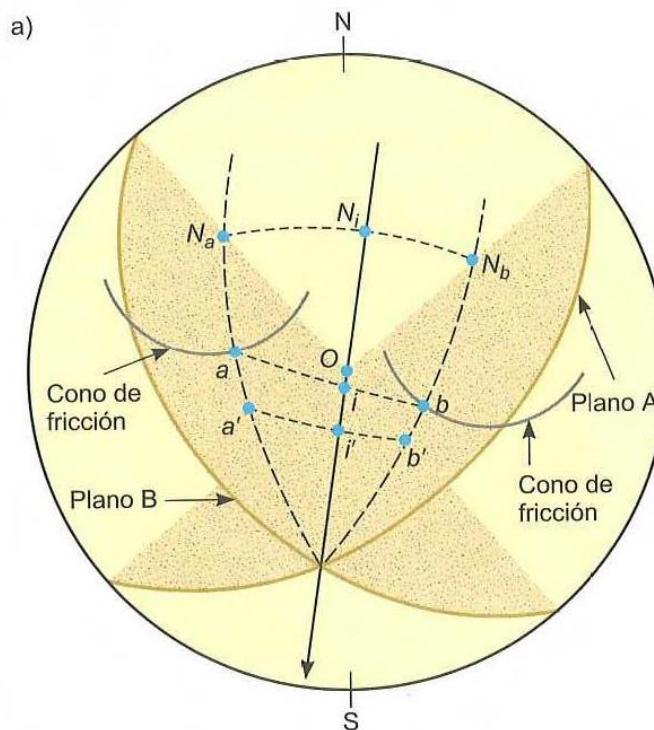


Fig. 2.9 Representación estereográfica para el análisis de taludes en cuña.

Fuente.- Ingeniería Geología – González de Vallejo

1. Representación de los planos de discontinuidades A y B y sus polos correspondientes N_a y N_b en el estereograma.
2. Dibujar la línea de intersección entre los dos planos.
3. Trazar dos grandes círculos desde el punto de intersección de los dos planos hasta el polo de cada uno de ellos N_a y N_b .

4. Dibujar los conos de fricción de cada uno de los planos de discontinuidad alrededor del polo correspondiente, para marcar el perímetro del cono de fricción se deberá marcar los grados correspondientes a ϕ_a y ϕ_b en todas sus direcciones alrededor de N_a y N_b respectivamente y siempre según los círculos máximos. En el caso que exista cohesión en los planos de fricción será necesario calcular los ángulos de fricción aparente de cada uno de los planos de discontinuidad, y serán estos ángulos los que se dibujen alrededor de los polos.
5. Trazar un gran círculo que atraviese las intersecciones de los grandes círculos realizados en el punto 3 con la de los conos de fricción (puntos a y b). Este gran círculo representa al plano PQ que contiene a los vectores Q_a , Q_b , Q_i , estos quedan representados en el estereograma por $0-a$, $0-b$ y 0 , siendo 0 en centro del estereograma y al mismo tiempo siendo la proyección de W .
6. Trazar un círculo máximo que una los polos N_a y N_b , determinando el punto N_i o punto de proyección de la resultante de las normales de los planos A y B, Este círculo representa el plano PN el cual contiene a N_a , N_b , N_i , quedando representado los vectores en el estereograma por $0-N_a$, $0-N_b$, y $0-N_i$.
7. Una vez dibujados los puntos N_i e i , se podrá medir el ángulo de rozamiento aparente correspondiente a la cuña, este ángulo queda definido por los vectores N_i y Q_i . El vector peso W define junto con N_i el ángulo τ .
8. El coeficiente de seguridad estará dado por la ecuación 2.21

2.3 Solución matemática para la estabilidad de un talud en cuña

La solución matemática, propuesta en este trabajo se basó en apéndice III del libro Rock Slope Engineering, el cual se basa en la resolución geométrica de la cuña definida por 5 superficies, incluyendo una superficie inclinada, una grieta de tensión, presión del agua, y la aplicación de dos fuerzas externas.

Las fuerzas externas que pueden actuar sobre la cuña incluyen soporte de anclaje pretensado, cargas de cimentación y fuerzas provocadas por un sismo. En la solución matemática las fuerzas son vectores definidos por su magnitud, dirección y sentido. Esta solución propone que todas las fuerzas actúen a través del centro de gravedad de la cuña de manera que no se generan momentos, por lo que no se toma en cuenta el deslizamiento rotacional.

2.3.1 Método de análisis

Como se mencionó anteriormente el análisis de la estabilidad utilizado en este trabajo se basó en el apéndice III del libro Rock Slope Engineering (Anexo 1). En esta propuesta encontramos una limitación geométrica, la cual se relaciona con las inclinaciones relativas del plano 3 (Corona del talud) y la línea de intersección, y una limitación con la presión de agua utilizada para poder calcular el factor de seguridad.

La limitación geométrica se presenta en cuñas con fuertes pendientes en el plano tres (Corona del talud), y una línea de intersección que tiene una caída menos profunda que la corona (es decir $\psi_3 > \psi_i$), en este caso no se producirá una intersección entre el plano y la línea de intersección, por lo que el programa no procederá al cálculo y mostrará un mensaje de “*Geometría Inválida*”. Esto es debido a que en el procedimiento de cálculo primero se calculan las dimensiones de la cuña general y luego se calculan las dimensiones del bloque que se encuentra por detrás de la grieta de tensión. Finalmente, las dimensiones de la cuña entre la cara y la grieta de tensión se la encontrará haciendo la resta de las dimensiones encontradas de la cuña global y la cuña superior.

La presión del agua. El análisis de la presión de agua se basa en el cálculo de los valores medios de la misma en los planos de deslizamiento (U_1 y U_2), y en la grieta de tensión (V). Estos valores se calculan suponiendo que la cuña está completamente saturada.

La presión de agua se la calcula con la altura máxima del talud H , es decir en la intersección del punto entre la corona (plano 3) y los dos planos de deslizamiento, y esta cae a cero en la intersección de los planos 1 y 2 con la pendiente del talud (cara del talud o plano 4) Fig 2.10.

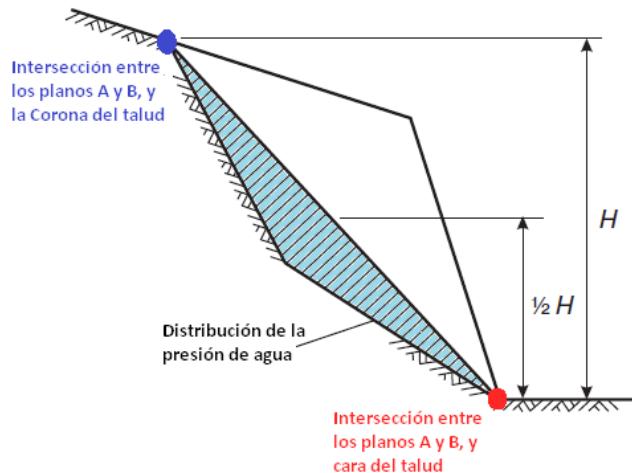


Fig. 2.10 Distribución de la presión de agua en un talud en cuña.

Cuando no existe una grieta de tensión, la presión de agua en los planos 1 y 2 se dan por $u_1=u_2=\gamma_w H/6$, siendo H la altura máxima de la cuña definida por los dos extremos de la línea de intersección.

Cuando existe una grieta de tensión tenemos que $U_1 = U_2 = U_5 = \gamma_w H_{5w}/3$, donde H_{5w} es la profundidad de la parte inferior del vértice de la grieta de tensión por debajo de la superficie de la corona del talud.

Las fuerzas de agua se calculan entonces como el producto de estas presiones y las áreas de los respectivos planos.

Para calcular la estabilidad de una cuña parcialmente saturada, las presiones reducidas se simulan mediante la reducción peso específico del agua, γ_w . Es decir, si se estima que la grieta de tensión se encuentra saturada solo a 1/3 de su altura, la unidad de peso se la dividirá entre tres $\gamma_w/3$, dato que se utilizará como un parámetro de entrada al programa.

2.3.2 Programación

Para la automatización de los procedimientos de análisis de estabilidad de taludes rocosos formados en una cuña se empleó el programa “Matlab” como plataforma de programación, la programación fue realizada para trabajar en la versión 2013 del mismo.

El planteamiento del programa se lo realizó en base a la secuencia de análisis y diseño de taludes en cuña propuesta por John W. Bray y Hoek (1981), y se resume en los diagramas de flujo presentados más adelante, como también en el “Anexo 2” se puede apreciar la escritura de programación del mismo. El diagrama 1 presenta el orden a seguir para poder realizar el análisis de estabilidad del talud, es en este diagrama que se incluyen 4 sub rutinas, que dependerán de las condiciones de entrada iniciales que le demos al programa.

El programa generado busca solucionar y facilitar los procedimientos de análisis de estabilidad de los taludes rocosos y para ello debe de realizar las siguientes funciones:

- Aplicar los criterios empíricos para la determinación de parámetros que definen la resistencia al corte del macizo rocoso.
- Realizar los procedimientos básicos de la metodología de proyecciones estereográficas, como son la proyección de los planos y líneas de intersección, como también direcciones de echado y buzamiento o echado de las mismas.
- Aplicar el análisis vectorial para el cálculo de las fuerzas actuantes y resistentes.
- Definir el factor de seguridad mínimo, para el análisis propuesto, así como la fuerza estabilizadora necesaria para un factor de seguridad dado.

La solución del programa permite trabajar con las presiones de agua en los dos planos de deslizamiento y en la grieta de tensión, como también trabajar con diferentes parámetros de resistencia en ambos planos de deslizamiento. El programa toma en cuenta una carga externa E y una fuerza de anclaje T del cable, calculando el factor de seguridad mínimo

para el caso que se requiera y de igual manera reducir al mínimo la fuerza de anclaje necesaria para un factor de seguridad solicitado.

2.3.3 Diagramas de flujo

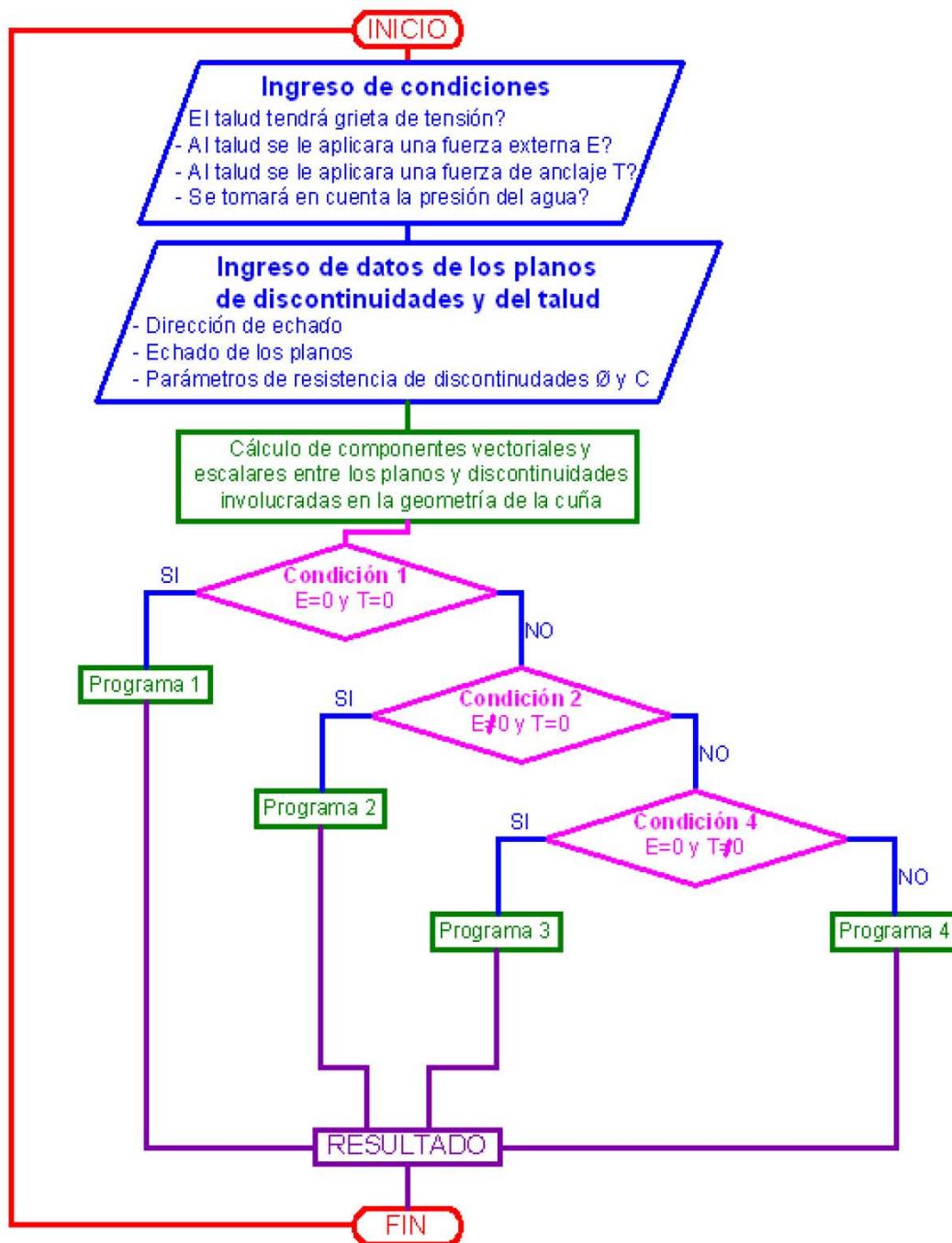


Diagrama 1 Diagrama de flujo principal

Fuente.- Elaboración propia

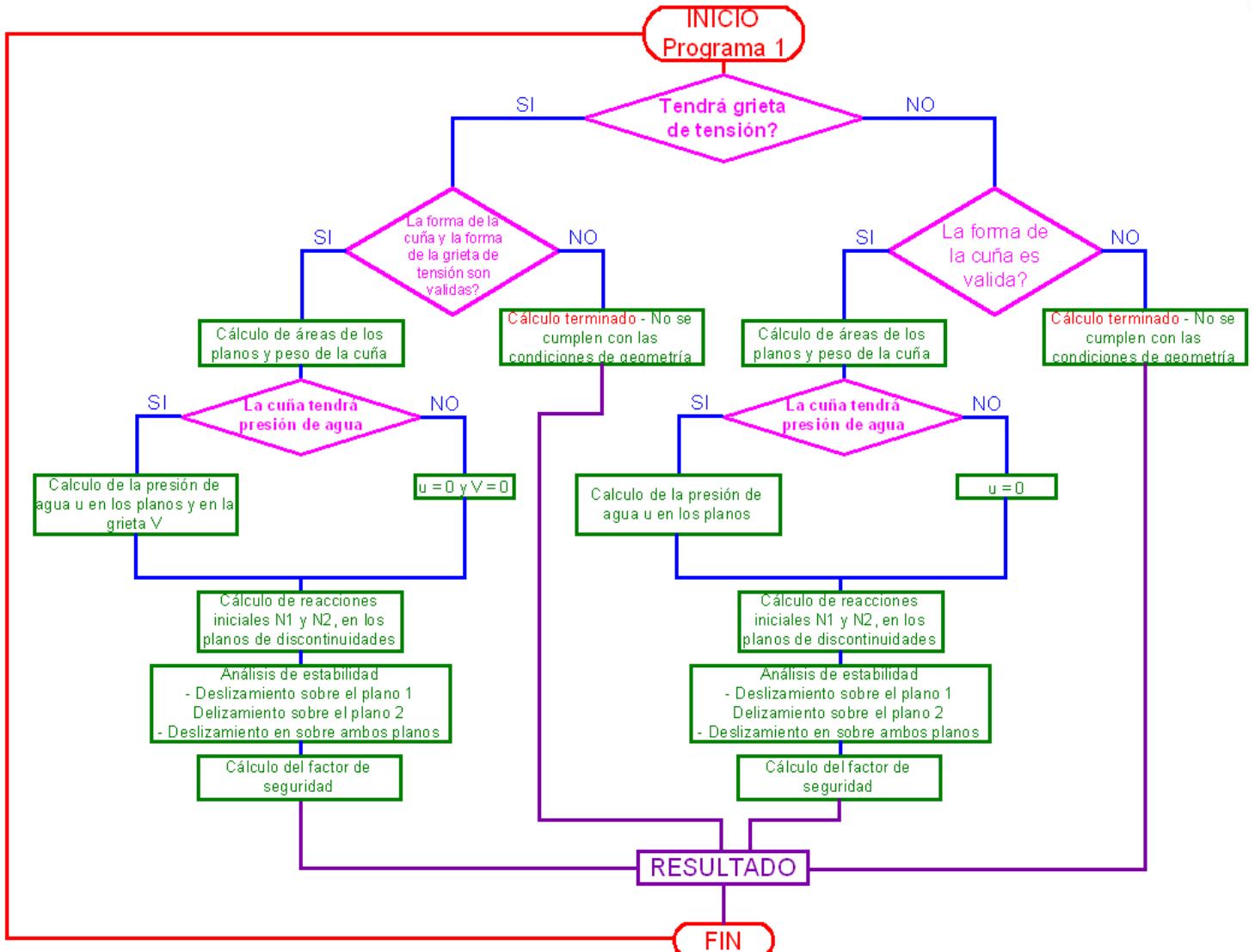


Diagrama 2 Diagrama de flujo Programa 1 - Cálculo de estabilidad sin fuerza externa y sin fuerza de anclaje

Fuente.- Elaboración propia

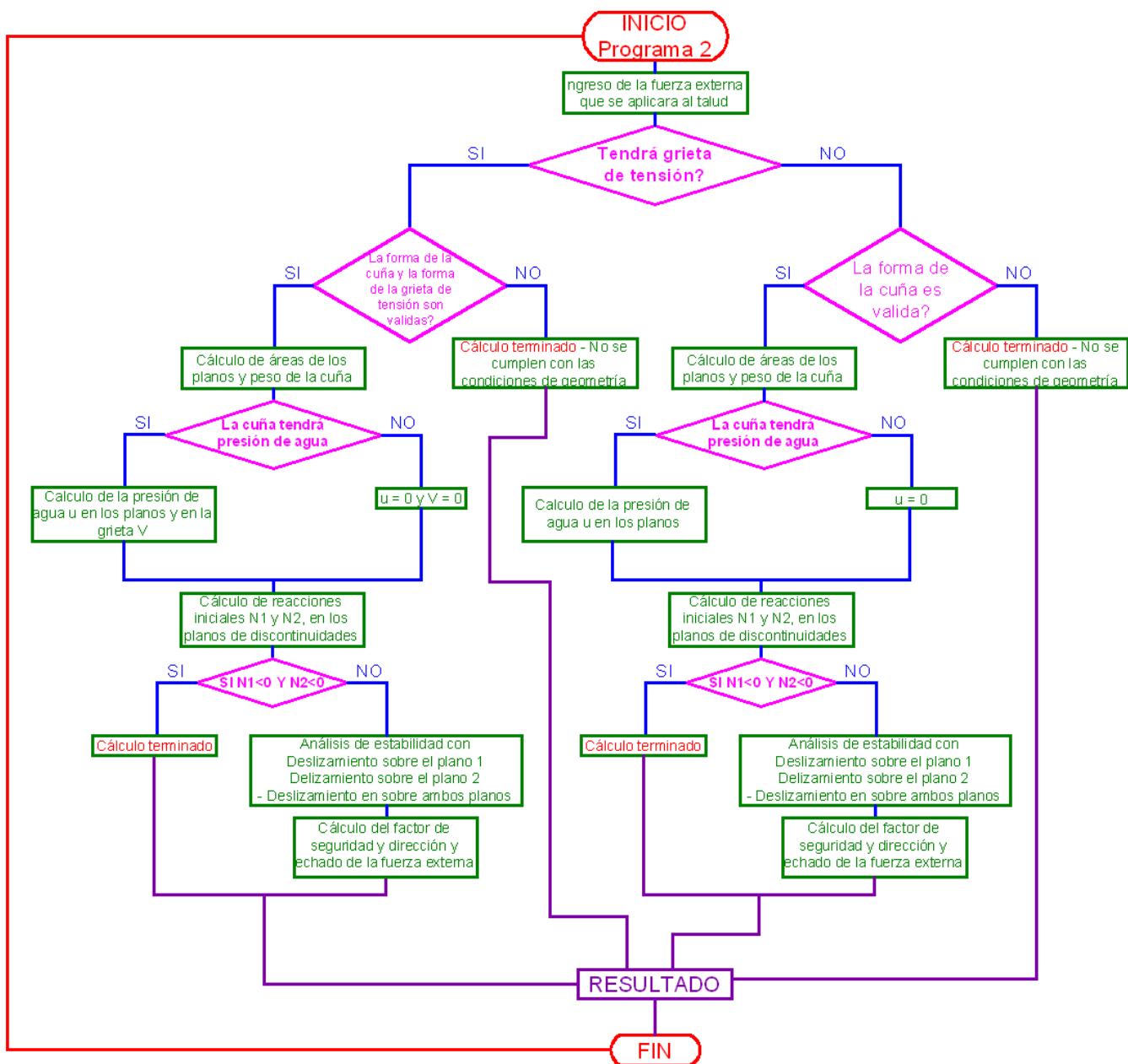


Diagrama 3 Diagrama de flujo Programa 2 - Cálculo de estabilidad con fuerza externa y sin fuerza de anclaje

Fuente.- Elaboración propia

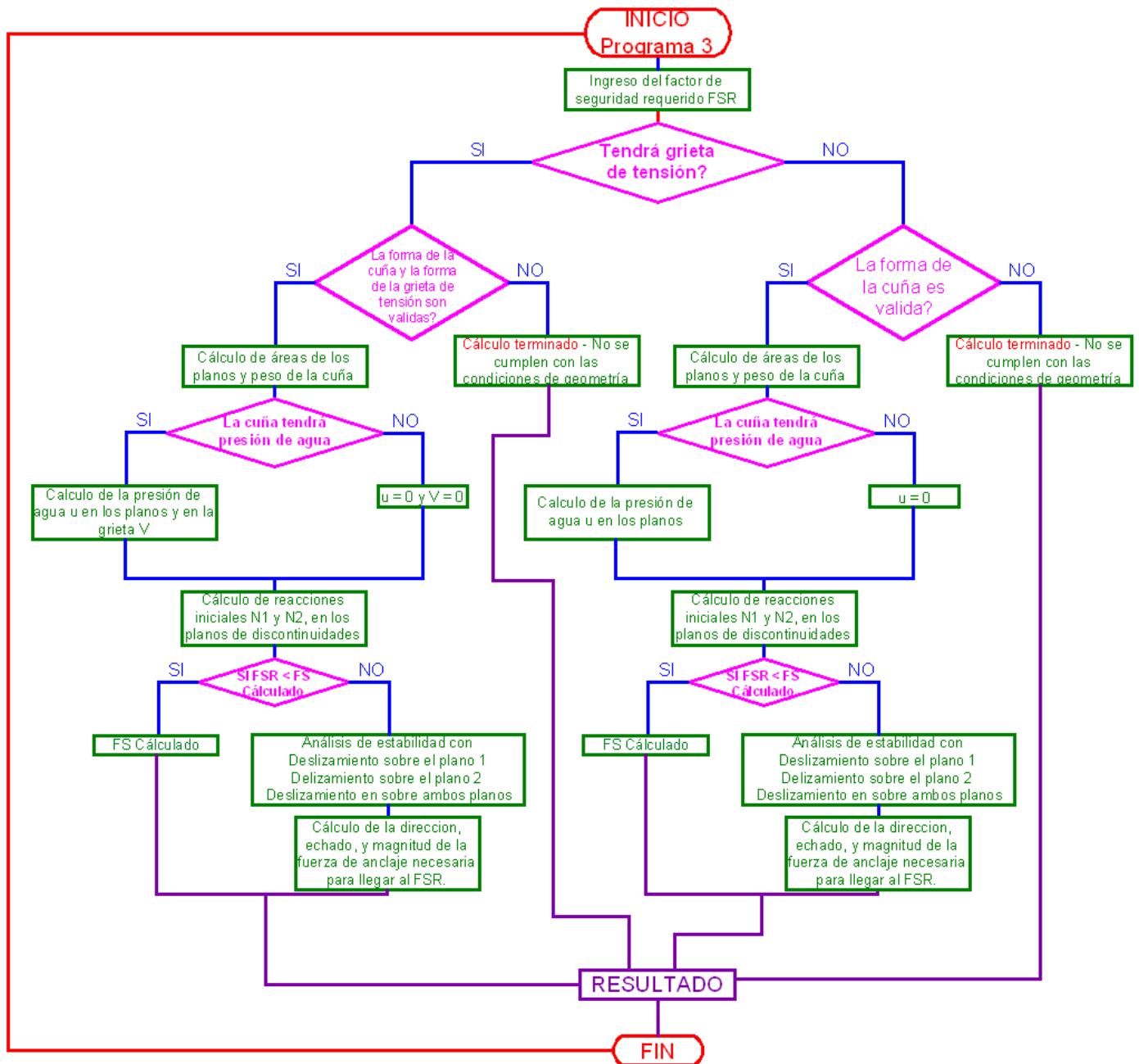


Diagrama 4 Diagrama de flujo Programa 3 - Cálculo de estabilidad sin fuerza externa y con fuerza de anclaje

Fuente.- Elaboración propia

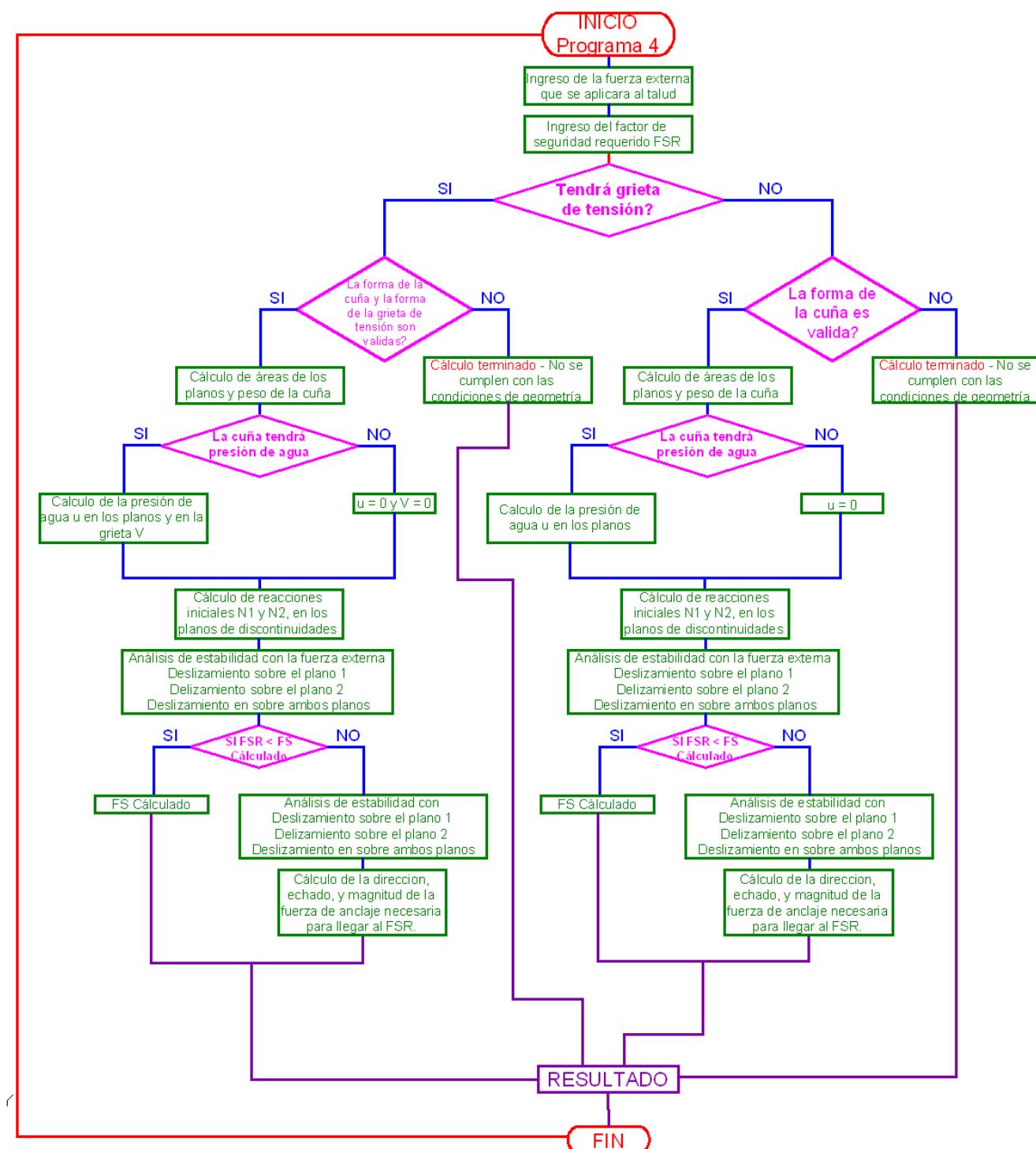


Diagrama 5 Diagrama de flujo Programa 4 - Cálculo de estabilidad con fuerza externa y con fuerza de anclaje

Fuente.- Elaboración propia



CAPÍTULO 3

Capítulo 3

3. Caso práctico, talud izquierdo de la Central Hidroeléctrica la Yesca

La presa la Yesca es una central hidroeléctrica que forma parte del sistema hidrológico Santiago, que comprende 27 proyectos con un potencial hidroenergético de 4300MW. Está ubicada en la porción limítrofe entre las entidades federativas de Nayarit y Jalisco, aproximadamente a 3.5Km aguas debajo de la confluencia de los ríos Bolaños y Santiago, sobre el cauce del río Grande Santiago, a 105 km al NW de la ciudad de Guadalajara. La boquilla de la P.H. la Yesca se localiza a 90 km. En línea recta al NW de la ciudad de Guadalajara.

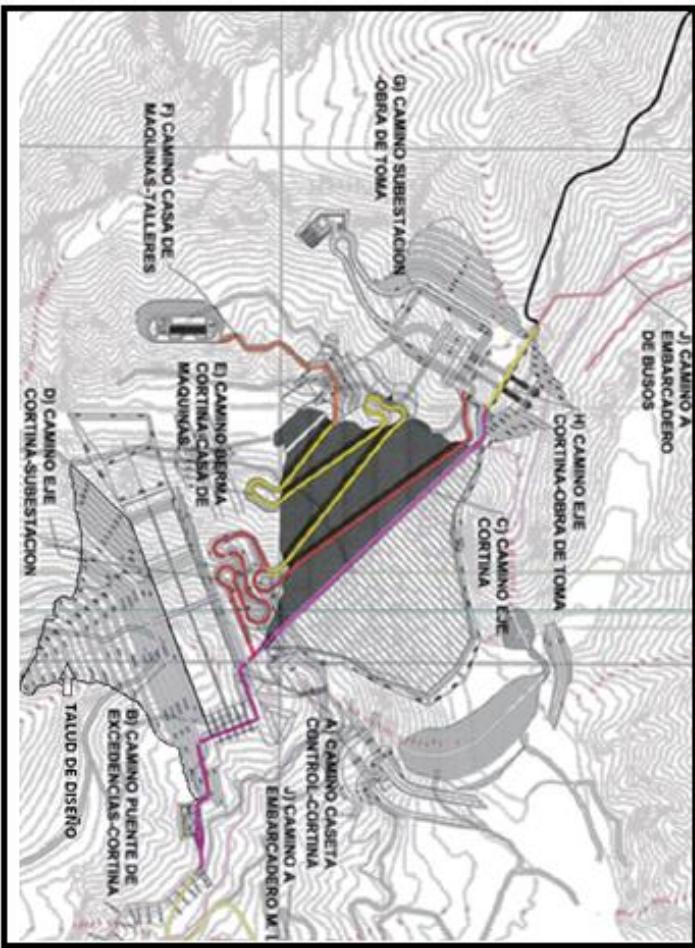


Fig. 3.1 Talud del izquierdo de la presa la yesca

Fuente.- Página de internet de la CFE

El talud con el cual se verificará el programa realizado, se encuentra emplazado en el margen izquierdo del Río Grande de Santiago a un lado de la central hidroeléctrica como se muestra en la figura 3.1. Esta obra de excedencia se compone de tres elementos principales, un canal de llamada, la estructura de control y el canal de descarga (figura 3.2).

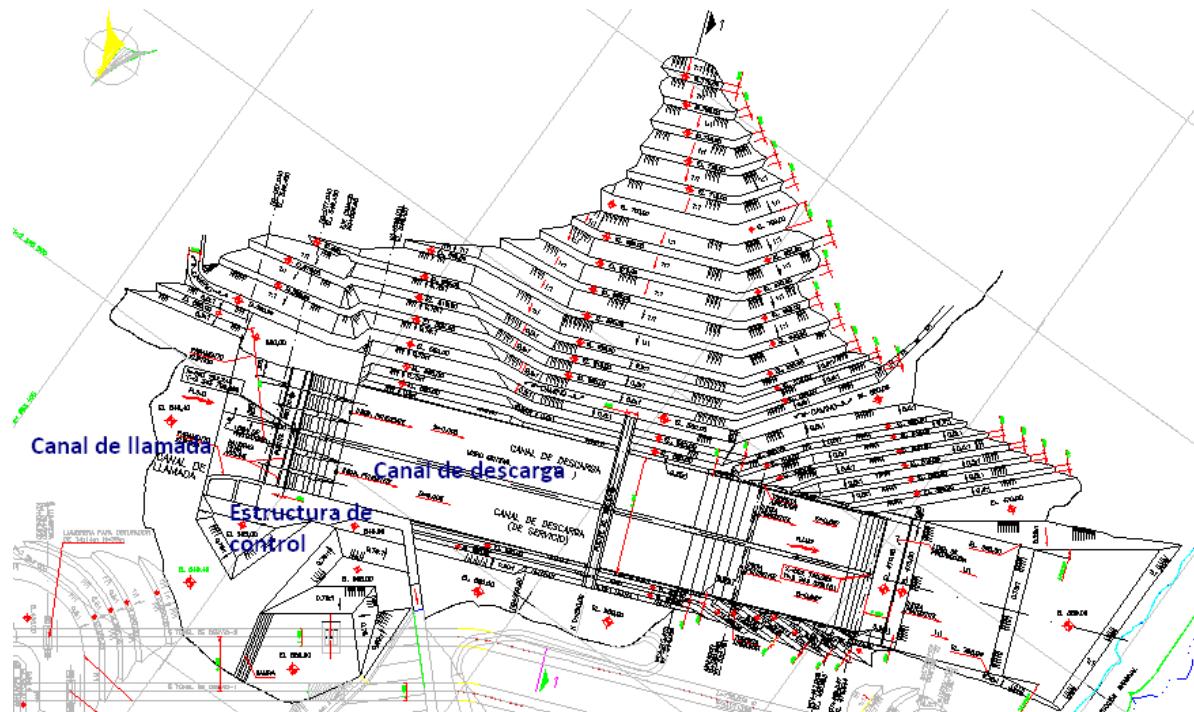


Fig. 3.2 Elementos principales en el talud izquierdo de la presa la yesca

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE.

El canal de llamada tiene una longitud de 110m aproximadamente y un ancho de 91.0 m, se encuentra a una cota de 549.4 msnm, se encuentra limitado a la izquierda por el talud de diseño y a la derecha tendrá un muro de concreto reforzado. La estructura de control se encuentra en la cota 556.0msnm y cuenta con 6 vanos de 12.0 m de ancho cada uno y compuertas radiales, La estructura de control se empotrarán en su lado izquierdo sobre los taludes de roca, mientras que en el lado derecho dada la mala calidad de roca se apoyará sobre un muro de concreto.

El canal de descarga tiene una longitud de 458.0 m, y 91.0m de ancho, se encuentra en la cota de 545.0 msnm, cuenta con un muro divisorio con galería central y remata en una cubeta reflectora que lleva el agua hacia un tanque amortiguador en la elevación 380.0 en el lecho del Río Santiago. El canal de descarga representa la mayor parte del volumen de excavación del vertedor de excedencias, presentando en su talud izquierdo en la porción central alturas máximas de 240.0 m, mientras que el talud derecho alcanzará una altura máxima de 40.0 m.

El talud izquierdo (Talud de diseño) del canal de descarga se excavará con taludes 0.50:1 y 0.75:1 horizontal: vertical, y bermas de 6.0 m hasta la elevación 625.0 y taludes 1:1 horizontal: vertical, y bermas de 6.0 m hasta la elevación 775.0. Datos que se verificarán más adelante. (Figura 3.3 - 3.4).

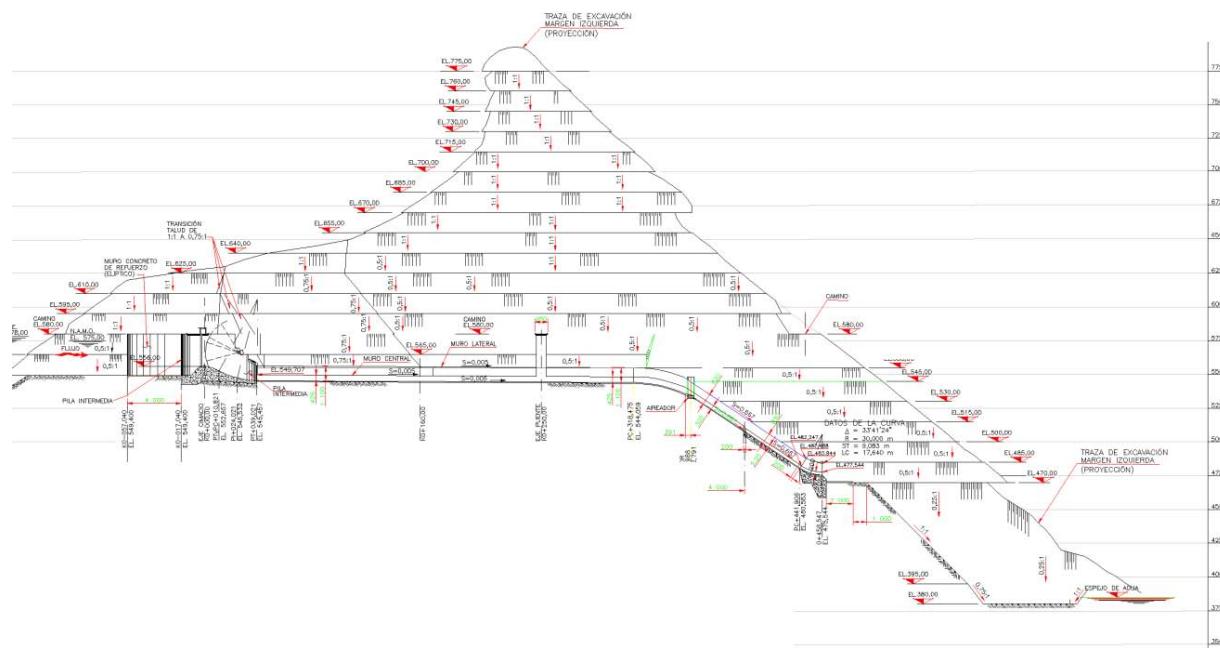


Fig. 3.3 Vista frontal del talud izquierdo de la presa la yesca

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R – CFE

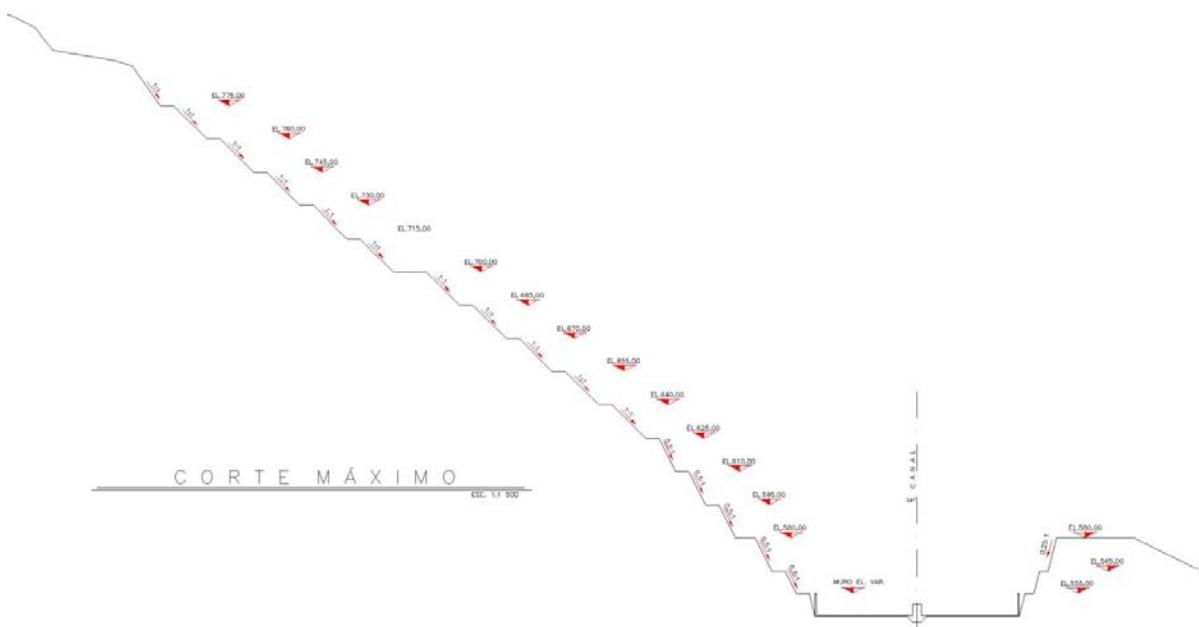


Fig. 3.4 Vista transversal del talud izquierdo de la presa la yesca

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R – CFE

El talud de diseño lateralmente presenta variaciones o transiciones de pendientes siguiendo la traza de la Falla Vertedor 1 (Línea azul –Fig.3.5), así como roca de mala calidad asociada a la misma en la parte superior del talud.

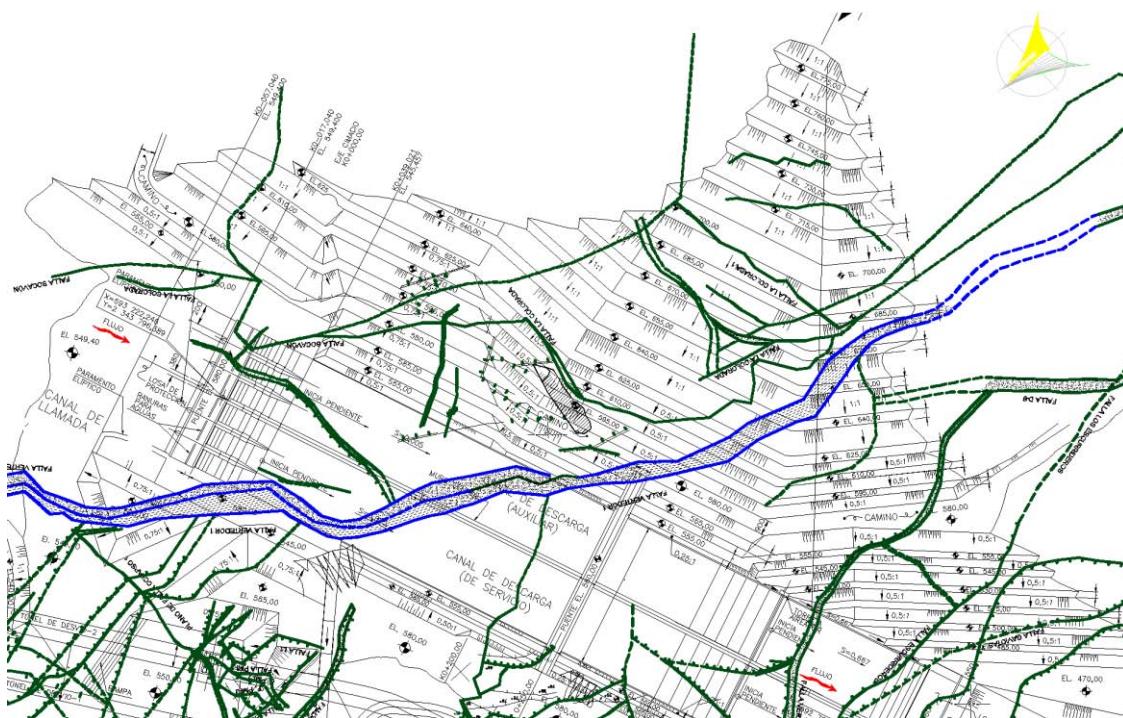


Fig. 3.5 Fallas representativas que cortan el talud de diseño (Azul – Falla Vertedor 1)

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R – CFE

3.1 Geología del sitio.

La columna geológica regional establecida para el sitio donde se asentara la P.H. la Yesca, está formada por rocas cenozoicas, que incluyen a andesitas y tobas andesíticas, provenientes de depósitos de origen volcánico-sedimentario, ignimbritas dacíticas, rocas ígneas intrusivas intermedias y diabásicas, conglomerados, basaltos y depósitos de talud.

En la zona inmediata a la boquilla, en ambos márgenes ubicación del talud de diseño, se tienen rasgos geológicos importantes representados por una topografía estrecha por el margen derecho de la obra y por cañadas asociadas a fallas en el margen izquierdo

El sitio donde se ubica el talud del margen izquierdo de la C. H. La Yesca, tiene diversas unidades litológicas, entre las que encontramos pórfidos andesíticos, ignimbritas dacíticas y riocárticas, también contiene diques de composición diabásica, ignimbritas riolíticas brechoides, tobas vítreas desvitrificadas, depósitos de paleocauce en terrazas aluviales, depósitos lacustres pumicíticos y depósitos de talud

La excavación que se realizará en el canal de llamada, se la hará en depósitos de talud (Qdt) como en dacitas porfídicas (Tmid) y riocárticas fluidales con diferentes calidades

estructurales, estas unidades se encuentran parcialmente cubiertas por materiales poco compactos de mala calidad, tales como la toba superior (Tmts), ignimbrita riolítica brechoide (Tmbr), depósitos de talud (Qdt), depósitos de terrazas aluviales (Qta) y depósitos lacustres y pumícitos (Qlp).

A continuación se describirán las unidades geológicas que se encuentran en la zona de estudio del talud de diseño:

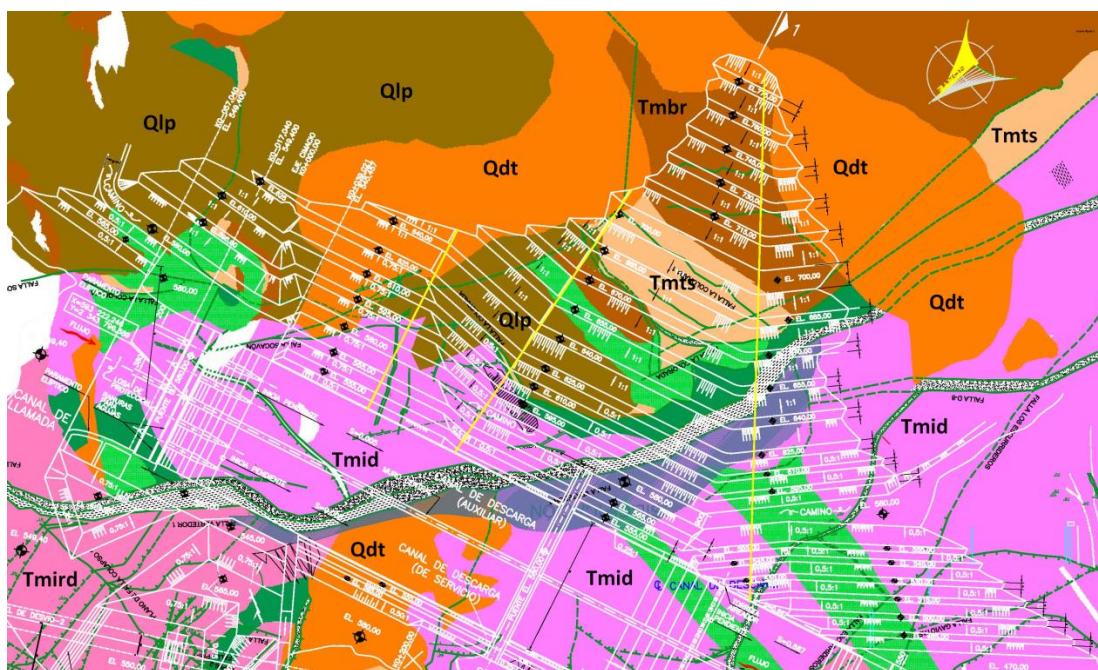


Fig. 3.6 Unidades geológicas a lo largo de la zona del talud de descarga.

- **Unidad Tmid.-** Se encuentra representada por una roca de color gris claro a gris oscuro cuando está inalterada y verdosa o rojiza cuando se encuentra alterada, es de textura porfídica, con abundantes cristales bien desarrollados de plagioclasa de 0.001 a 0.004 m de diámetro, contenidos en una matriz afanítica y silicificada, mostrando en algunos sitios sulfuros diseminados; hacia la porción basal, cerca del contacto con la unidad riódacítica infrayacente, en algunos sitios son apenas identificables líneas de fluides y fiammes; está intrusión por diques riódacíticos, andesíticos y diabásicos (Tgr, Tda, Qdd). La masa de roca exhibe estructura masiva y en ocasiones se muestra seudoestratificada, es dura y compacta, sin embargo típicamente se encuentra afectada por un fuerte fracturamiento, algunos planos de fracturas se presentan con arcilla y carbonatos, mientras que otros muestran una pátina de oxidación.
- **La Unidad Tmird.-** Esta unidad exhibe un denso fracturamiento a pesar de su alta dureza, se identifica como “dacita fluidal” y se trata de una roca piroclástica de composición riódacítica de color gris claro que varía a pardo y ocre, que al intemperizar adquiere tonalidades amarillentas, ocres o gris muy oscuro, tiene una textura fluidal que va desde afanítica hasta porfídica y una estructura seudoestratificada, con seudoestratos que tienen espesores variables de 0.20 a 1.50 m. El macizo rocoso se presenta fuertemente

silicificado debido a alteración hidrotermal que ha sellado gran parte de las discontinuidades presentes, lo que ha producido una roca muy dura y cohesiva.

- **La Unidad Tmts.-** se clasifica como “toba vítreas desvitrificadas”, es una roca de color verde claro, compacta pero no cementada, de textura piroclástica brechoide, constituida por fragmentos muy alterados de líticos sub angulosos a sub redondeados de hasta 1.50 cm y fragmentos de vidrio y pómex, contenidos en una matriz tobácea de grano medio a fino, se encuentra fuertemente propilitizada, deleznable al contacto con el agua, contiene también amígdalas rellenas de calcedonia y escasos cristales de plagioclasas. Muestra una estructura seudoestratificada, con estratos de 0.30 a 0.50 m de espesor.
- **Unidad Tmbr.-** es una “ignimbrita riolítica brechoide”, es una roca de color rojizo que por alteración adquiere tonalidades pardas, posee textura piroclástica que varía de brechoide a tobácea y aún eutaxítica de tipo ignimbrítico, su estructura es masiva a seudoestratificada y sus características geomecánicas son de alta dureza y cohesividad, producto de una fuerte silificación derivada de alteración hidrotermal.
- **Unidad Qta.-** Esta unidad está constituida por terrazas aluviales, las cuales se encuentran conformadas por conglomerados (Fig. 3.8) que incluyen grandes bloques y clastos bien redondeados y mal clasificados de 0.25 a 1.50 m de diámetro, derivados principalmente de ignimbritas y tobas riolíticas, riodacíticas y dacíticas, fragmentos de granodioritas y de pórfito andesítico, contenidos en una matriz de gravas, arenas y limos, con moderado grado de consolidación, dispuestos en capas sub horizontales o de forma lenticular, los espesores que forman esta unidad varían de 2.00 a 15.00 m.



Fig. 3.7 Unidad Qta, conformada por conglomerados y clastos bien redondeados.

- **Unidad Qlp.-** Esta unidad está compuesta por Tobas pumícitas y Depósitos pumícíticos lacustres, que afloran en el sector oriental del área de estudio, en la parte alta del macizo rocoso, tiene una matriz tobácea de grano fino que constituye islotes irregulares rodeados y cubiertos por una mezcla heterogénea de abundantes fragmentos líticos y de pómez, contenidos en una matriz arcillosa arenosa, constituyendo delgadas capas horizontales continuas o de forma lenticular.
- **Unidad Qdt.-** Se encuentra en casi toda la zona de estudio y se identifican principalmente en los sitios de cambios bruscos de pendiente, están conformados por materiales de tamaño y forma heterogéneos que van desde pequeños fragmentos de 0.05m hasta grandes bloques de más de 5.00 m de diámetro, aglutinados entre materiales limo arenosos. La gran mayoría de los fragmentos o bloques se han desprendido de las partes más elevadas del área, a consecuencia de caídos por gravedad o formados por la desintegración provocada por el interperismo. Estos depósitos de talud son de reciente formación y cubren los afloramientos, siendo destacable que en algunos sitios alcanzan hasta 20.00 m de espesor.

3.2 Geología estructural.

El margen izquierdo de la central hidroeléctrica la Yesca, en donde se levantara el talud, presenta una topografía menos accidentada, con pendientes topográficas que varían entre 30-35°, sin embargo en la parte más alta de las laderas sobresalen dos grandes estructuras geológicas que producen líneas de escarpes muy evidentes con paredes casi verticales, las cuales están asociadas a las fallas Vertedor 1 y El mirador (Fig. 3.6).

Se determinó cuatro familias de discontinuidades en la zona, entre las que tenemos fallas Vertedor 1 y 2, Mogote y Socavón, como también se identifican varios sistemas de fracturamiento los cuales se los explicará a continuación:

3.2.1 Fallas.

A partir de las exploraciones superficiales se identificaron las fallas que afectaran al talud. Superficialmente se identificaron fallas y zonas de falla con espesores de 0.50 a 50 m, contienen roca brechada y cizallada con contenidos de arcilla entre sus planos. En la tabla 3.1 se muestra el resumen de todas las fallas importantes que se encuentran en la zona del talud estudiado, entre las más representativas tenemos:

- **Falla Vertedor 1.-** tiene orientación preferencial N25°E/65°SE, y es la estructura más importante que afecta al margen izquierdo, debido a su continuidad, espesor, características geométricas y su posición casi paralela al canal vertedor, particularmente esta falla afectará parte del canal de llamada, muro alabeado, piso del canal y hasta el cadenamiento 0+334.0m de los taludes izquierdos del canal de descarga. La falla Vertedor 1 está constituida de roca triturada y molida con arcilla caolinítica, que además presenta espacios vacíos, siendo el contacto estructural entre la toba vítreo y las riolitas con la ignimbrita riodacítica y dacita fluidal.

- **Falla Mogote.**- también es una estructura geológica importante, ya que constituye una frontera entre la dacita porfídica y un grueso depósito de talud que contiene grandes bloques de roca de hasta 25.0 m de diámetro dentro de material semiconsolidado.

Falla	Orientación	Espesor (m)	Continuidad	Relleno	Obra civil afectada	Observaciones
			(m)			
Mirador	N18-20°E/70 a 85°NW	10.0 a 15.00	500.00	Brecha, arcilla y óxidos	taludes izquierdos del canal vertedor	Varios planos de falla paralelos entre si
Vertedor	N18-20°E/60 a 70° SE	5.00 a 30.00	500.00	Roca triturada y molida y arcilla caolinítica	Zona de estructura de control, taludes izquierdos del canal vertedor	Presenta espacios vacíos, contacto estructural entre toba vítreo y riolitas con la ignimbrita dacítica y dacita fluidal
Olga	N75°W/ 65° NE	0.50 a 5.00	350.00	Brecha parc.. cementada y poca arcilla	taludes derechos del canal vertedor	Esta falla es cortada por la falla mirador; el espesor máximo de la falla se localiza a la orilla del río Santiago
Mogote	E-W/78°-82° N	.30,0 a 50.00	200.00	Brecha bien cementada y silicificada	Estructura de control y taludes derechos del vertedor	Afecta principalmente a la dacita porfídica
Lavadero	N – S/53° W	0.60	200.00	Brecha y Roca fracturada	Portales de salida de los túneles de desvíos	Grandes bloques de 15*5*5 m, con salida hacia el cauce del río (Fotografía 15)

Tabla 3.1 Principales fallas en el margen izquierdo de la central hidroeléctrica la Yesca

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE

3.2.2 Sistemas de fracturamiento y estratificación

Se identificaron cuatro sistemas de fracturamiento y la seudoestratificación, y se consideró de forma adicional el fracturamiento asociado a la falla Lavadero que afectará el extremo SW del canal, en la tabla 3.2 se indican las direcciones y echados de los sistemas de fracturamiento, así como su representación estereográfica en la figura 3.8, en la tabla 3.3 se podrá apreciar las principales características de los sistemas de fracturamiento existentes.

La seudoestratificación se presenta en las unidades Tmird y en ocasiones en la unidad Tmid, está compuesta por seudoestratos que tienen espesores entre 0.20m y 1.5m, su trazo es continuo, con planos de rugosidad ondulados-lisos, plano-rugoso, y con contactos cerrados roca-roca. La estratificación tendrá una gran influencia en la formación de las fallas a lo largo de toda la obra.

Sistema	Rumbo/Echado
Sistema 1	N34W / 66NE
Sistema 2	N45E / 57SE
Sistema 3	N82W / 76NE
Sistema 4	N10E / 59SE
Estratificación	N36W / 46SW
Falla lavadero LAV	N25E / 65NW

Tabla 3.2 Familias de discontinuidades de la zona del talud de diseño

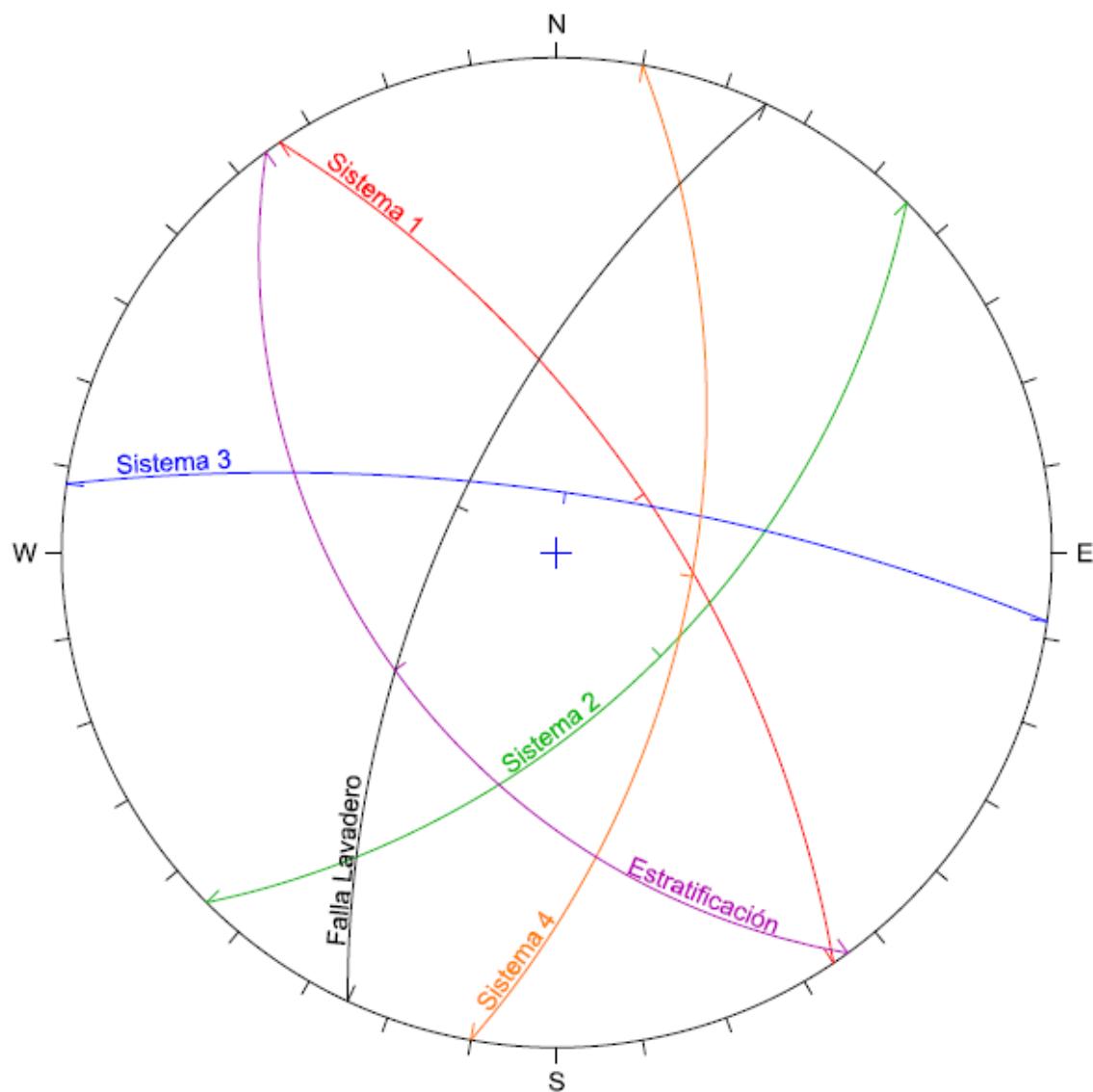


Figura 3.8 Estereograma de las familias de discontinuidades de la zona del talud de diseño

Sistema	Continuidad	Frecuencia por metro lineal	Rugosidad	Abertura entre planos (cm)	Observaciones
Estratificación	60.00 m o más hasta perderse en los depósitos disgregables.	De 1 a 5 y en ocasiones hasta 7 planos	Planas-onduladas y planas-rugosas	De cerradas a 0.05 cm	Esta discontinuidad se encuentra presente en la unidad dacítica fluidal y en la toba lítica.
Sistema 1	0.6 a 10.0 m o más hasta perderse en los depósitos disgregables.	De 1 a 5 fracturas	Plana-rugosas y escalonadas-rugosas	De cerrada a 0.01cm En la roca sana las fracturas tienden a estar cerradas.	Es abundante y continuo. En algunos planos se tiene impregnaciones de óxidos de hierro y arcilla.
Sistema 2	0.30 a 7.00 m hasta perderse en los depósitos disgregables.	De 1 a 3 y ocasionalmente 7 fracturas	Ondulada-lisos.	De cerradas hasta abiertas 0.03. En la roca sana estas discontinuidades se encuentran cerradas.	Es importante por su abundancia. Entre las superficies de contacto se observan, en algunos casos, impregnaciones de arcilla, óxidos de hierro y suelo orgánico.
Sistema 3	0.02 a 8.00 m	1 a 3 fractura y esporádicamente hasta 10	Ondulada-lisas, plana-rugosas	De cerradas hasta 0.07, este último valor en roca descomprimida	Entre las superficies de contacto se observan, en algunos casos, impregnaciones de arcilla, óxidos de hierro y suelo orgánico.
Sistema 4	0.10 a 12.00 m	1 a 4 fractura	Ondulada-lisa, plana-rugosa	De 0.005 a 0.05, este último valor en roca descomprimida	Es persistente La superficie de contacto de algunas fracturas presenta impregnaciones de óxidos de hierro.

Tabla 3.3 Características de las Familias de discontinuidades de la zona del talud de diseño

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE

3.2.3 Sismicidad.

El patrón sísmico predominante en la región es de tipo enjambre y se asocia principalmente con las fosas tectónicas de Tepic-Chapala y Chapala-Colima. Para este estudio se adoptó un valor medio en rocas, para el coeficiente sísmico de 0.18 en la componente horizontal. De acuerdo al estudio de riesgo sísmico para la zona generado por el Departamento de Sismotectónica de CFE.

3.3 Características del macizo rocoso.

Para la caracterización del macizo rocoso, se hicieron varios estudios de exploración directa con sondeos y recuperación de núcleos en un diámetro NQ (47mm), complementados con exploración indirecta, por medio de métodos geofísicos de sísmica de refracción y sondeos eléctricos verticales, de igual manera se excavaron tres socavones dirigidos al sitio en donde se encontrara el talud izquierdo (Talud de diseño).

En la zona se realizaron 18 barrenos, y tres socavones (Exploración directa), como también se realizaron estudios geofísicos, sobre los cuales se desarrollaron una serie de secciones geofísicas acordes a las secciones geológicas.

Una vez obtenidos los datos de campo con el objeto de determinar las propiedades índice y mecánicas de la roca intacta, se efectuaron ensayos de laboratorio, en las rocas recuperadas en los sondeos de exploración directa realizados, las pruebas que se realizaron a estos núcleos de roca fueron los siguientes:

- Determinación del Contenido de Agua
- Determinación del Peso Volumétrico, al Ambiente y Saturado
- Determinación del Índice de Alteración
- Determinación del Índice de Absorción
- Resistencia a la compresión Simple, Modulo de Deformabilidad (E_{t50})
- Resistencia a la Tensión Indirecta
- Velocidades Sónicas Primaria y Secundarias
- Módulo de Elasticidad Dinámico
- Relación de Poisson
- Pruebas de Corte Directo

Los resultados promedio de dichos ensayos se muestran en tablas siguientes:

ENSAYE	PROMEDIO
Peso Volumétrico (kN/m ³)	25.08
Compresión Simple (MPa)	76.20
Módulo Tangente E_{t50} (MPa)	46977
Tensión Indirecta (MPa)	15.20
Velocidad Primaria (m/s)	5 634
Módulo de Elasticidad Dinámica (MPa)	56 286
Relación de Poisson	0.31

Tabla 3.4 Valores Promedio de la unidad Tmid (Dacita Porfídica)

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R – CFE

ENSAYE	PROMEDIO
Peso Volumétrico (kN/m ³)	24.56
Compresión Simple (MPa)	132.70
Módulo Tangente Et ₅₀ (MPa)	48 299
Tensión Indirecta (MPa)	27.80
Velocidad Primaria (m/s)	5 047
Módulo de Elasticidad Dinámica (MPa)	46 516
Relación de Poisson	0.29

Tabla 3.5 Valores Promedio de la unidad Tmird (Dacita Fluidal)

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE

Se obtuvieron muestras, que contienen la principal discontinuidad en el macizo rocoso (contacto roca-roca). Se ejecutaron pruebas de corte directo para la determinación de los parámetros de cohesión y fricción (Tabla 3.6) y posteriormente tomando como base estos resultados, se aplicó el criterio de Barton-Choubey para la estimación de la gama de características asociados a los sistemas de fracturamiento, estratificación y fallas.

Tipo de Junta	Mohr - Coulomb		Barton - Choubey		
	Ø(°)	C (t/m ²)	Ør (°)	JCS	JRC
Contacto Roca-Roca	36	12.7			
Relleno Duro	35	5.0	28	900	4
Relleno Blando	29	5.4	24	500	5

Tabla 3.6 Parámetros de resistencia de las discontinuidades.

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R – CFE

3.3.1 Clasificación geo mecánica del macizo rocoso

Para la clasificación geomecánica, se consideraron las secciones geológico geofísicas, para zonificar los materiales regidos por las siguientes características: litología, alteración, velocidades primarias determinadas por geofísica, sondeos eléctricos y características de barrenos de exploración. Se construyeron secciones de las unidades geotécnicas, a partir de las cuales se realizó la clasificación geomecánica. En la figuras 3.9 se muestra las secciones 0+000, 0+145 y 0+229 en las cuales se pueden apreciar las secciones geofísicas y la zonificación de los materiales.

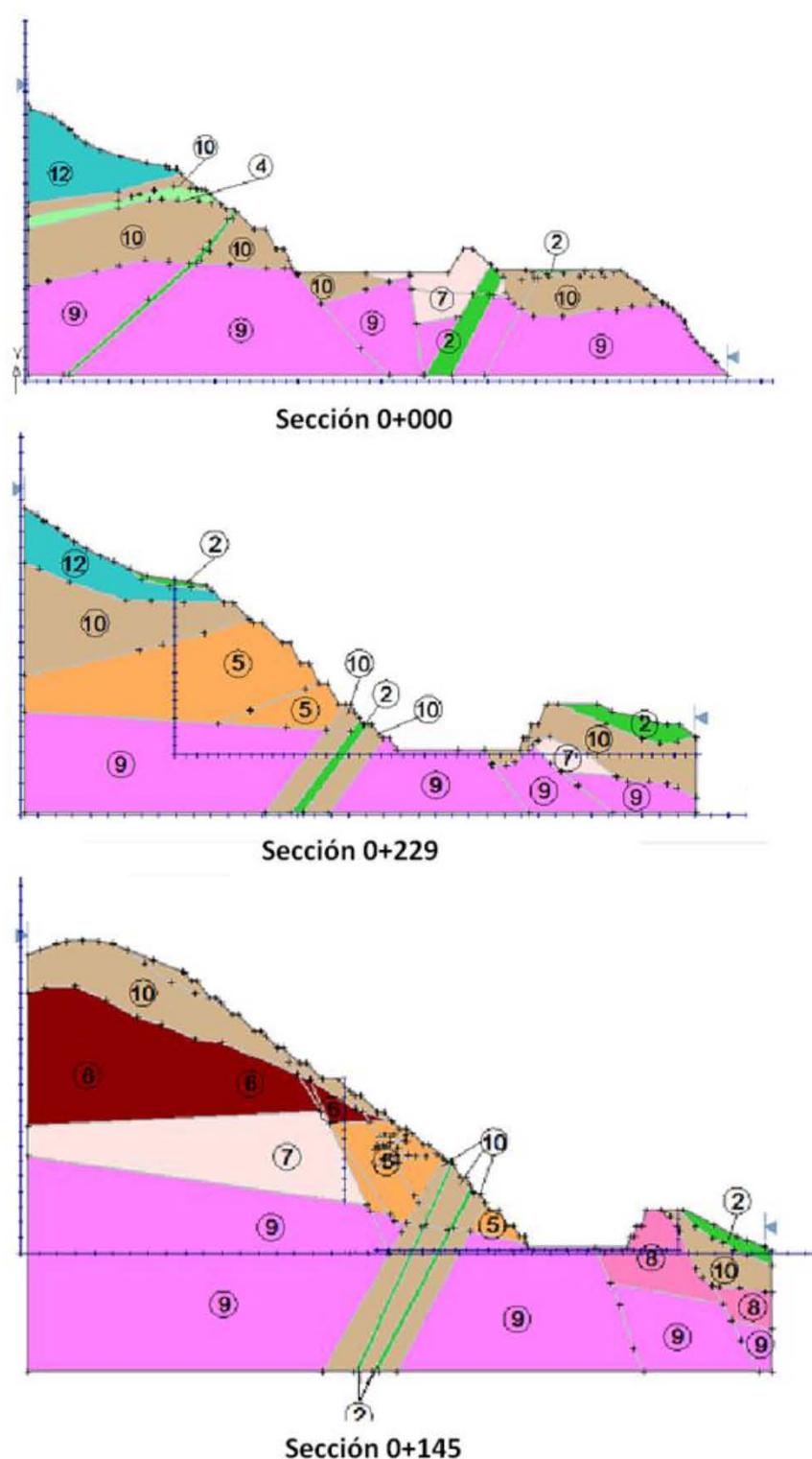


Fig. 3.9 Modelo Geotécnico Secciones 0+000, 0+145 y 0+229

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE

Con los resultados de las exploraciones directas e indirectas y las propiedades de la roca intacta, se realizó la correspondiente clasificación geomecánica media del macizo rocoso aplicando el criterio de Bieniawski de 1989, se determinó el valor de RMR (Rock Mass Rating), para todas las unidades a excepción de las unidades 1 y 12, las cuales se estimaron a partir de tablas. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.7. En el anexo 3 en donde se puede apreciar con mayor detalle la caracterización mecánica por unidades litológicas.

Unidad No	Descripción	RMR	Clase	Calidad
1	Depósito de Talud Qdt	----	----	----
2	Zona de Falla Vertedor y Fallas en General	15	V	Muy Mala
3	Zona de Diques (en los respaldos)	12	V	Muy Mala
4	Toba Vítreo Tmts	24	IV	Mala
5	Dacita Decomprimida	39	IV	Mala
6	Riolita Brechoide Decomprimida	31	IV	Mala
7	Dacita Porfídica 2.7 km/s	55	III	Regular
8	Dacita Porfídica 3.8 km/s	63	II	Buena
9	Dacita Fluidal 3.2 km/s	65	II	Buena
10	Dacita-Riolita Brechoide muy Fracturada 1.7 km/s	22	IV	Mala
11	Riolita Brechoide Fracturada 2.5 km/s	51	III	Regular
12	Depósitos Lacustres	----	----	----

Tabla 3.7 Calidades de roca en las unidades geológicas del talud

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R – CFE

De acuerdo a los resultados, se tienen en su mayoría calidades de roca de muy mala a mala y solamente en la roca que se adentra en la masa rocosa y se aleja de las estructuras geológicas dominantes la condición mejora con una calificación máxima de buena calidad. A partir de los datos de compresión simple, GSI, y la constante *mi* para una roca intacta, se utilizó el criterio de Hoek – Brown, para así poder determinar los parámetros de la masa rocosa, los parámetros de compresión simple se obtuvieron de los datos de laboratorio, y se estimaron en algunos materiales de los cuales no se contaban con los datos. El GSI se lo tomo a partir del RMR y el valor *mi* se lo considera mediante tablas de referencia según el tipo de roca. Los resultados obtenidos se los muestra en la tabla 3.8.

Parámetro	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
	Falla Vertedor (fallas en general)	Zona de Dique (Solo el relleno de contactos)	Toba Vítreo	Dacita Porfídica Decomprimida	Riolita Brechoide Decomprimida (2,5 km/s)	Dacita Porfídica 2,7 km/s (color carne)	Dacita Porfídica 3,8 km/s	Dacita Fluidal 3,2 km/s	Dacita-Riolita Brechoide Muy Fracturada 1,7 km/s (café claro)	Depósitos Lacustres Qip
GSI=	10	7	19	34	26	50	58	60	17	----
sigci (Mpa)=	20	5	25	50	50	90	90	132	30	----
mi=	15	15	18	25	25	28	28	28	23	----
mb/mi =	0.04	0.04	0.06	0.09	0.07	0.17	0.22	0.24	0.05	----
mb =	0.60	0.54	1.00	2.37	1.78	4.69	6.25	6.71	1.19	----
s =	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	----
a =	0.6	0.615	0.555	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.565	----
E (Mpa)=	1000	841	1679	3981	2512	10000	15849	17783	1496	2000
phi (°) =	26	25	32	36	39	45	50	42	33	30
coh (Mpa) =	0.15	0.03	0.25	0.60	0.91	1.80	2.47	2.27	0.30	0.250
sigcm (Mpa)=	0.478	0.102	1.037	4.467	3.811	12.107	15.039	23.417	1.296	----

Tabla 3.8 Parámetros de Resistencia de las Unidades del talud de diseño

Fuente.- Informe 06/081/SGMV/R – CFE



CAPÍTULO 4

Capítulo 4

4. Análisis de estabilidad. Aplicación del método analítico.

Para definir los criterios de diseño, se analizó la información geotécnica del talud, mencionada en el capítulo anterior, y a partir de ella, se identificaron los posibles mecanismos de falla que pudieran darse y de esta manera podrían afectar la estabilidad del talud en general.

El talud de diseño se ubica en el margen izquierdo del río grande Santiago, analizándose inicialmente tres direcciones de echado diferentes, las cuales se rigieron sobre la topografía de la zona como se muestra en la figura 4.1. La metodología de análisis definió el talud de diseño, el cual se compondrá por los taludes intermedios, los cuales formarán el talud total.

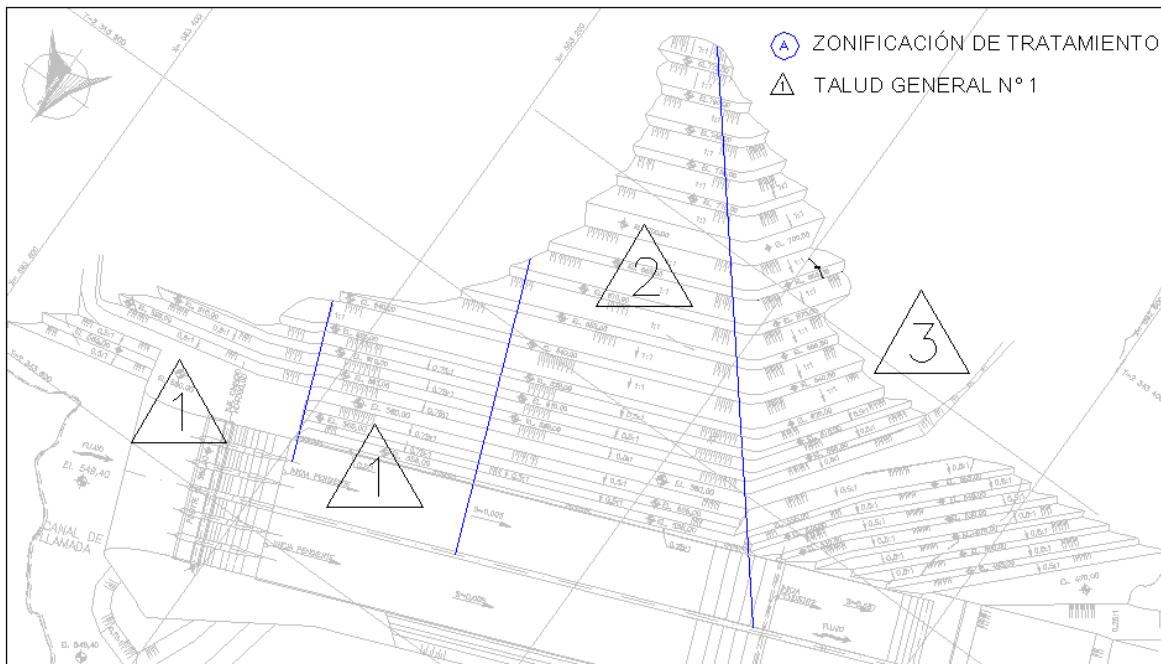


Figura 4.1. Zonificación del talud de diseño

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE.

El talud inicial como se mencionó se dividió en tres secciones talud general 1, talud general 2 y talud general 3, las direcciones y los echados se las muestran en la tabla siguiente:

Talud	Dirección y echado	Cadenamiento
General 1	347.2 / 45 -75	555.0 - 640.0
General 2	338.6 / 45 -75	555.0 - 775.0
General 3	306.1 / 45 -75	485 - 775.0

Tabla 4.1 Dirección de echados de taludes generales 1-3

El factor de seguridad contra falla de las excavaciones se evaluó con el Método de Equilibrio Límite, el cual plantea una comparación entre las fuerzas que se oponen al deslizamiento (resistencia al esfuerzo cortante en el plano de falla y/o trayectoria de falla en la masa rocosa) y las que lo propician (componente tangencial del peso propio del bloque, más el efecto de las acciones sísmicas y el empuje hidrostático o de supresión), utilizándose los siguientes factores para el análisis:

Condición de análisis (fuerzas actuantes)	Factor de seguridad mínimo
Peso propio (estático)	1.5
Peso propio + 100% sismo + 100% empuje hidrostático o supresión	1.2

Tabla 4.2 Factores de seguridad empleados para el análisis de taludes.

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R – CFE

4.1 Análisis de taludes en roca en el margen izquierdo

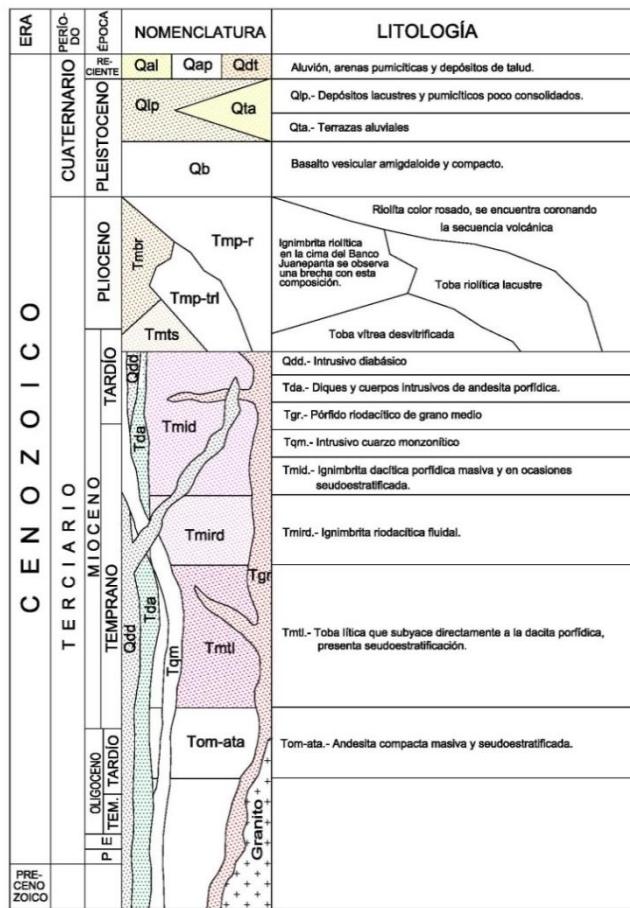


Figura 4.2. Columna Geológica de la zona del talud diseño

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE.

Dentro del macizo rocoso se tienen distintos tipos de litologías, entre las estructuras geológicas que se forman, tenemos las discontinuidades y las condiciones de meteorización y alteración de la masa. Características que representan al macizo rocoso en general. En este análisis las estructuras geológicas que rigen el comportamiento del macizo rocoso son las discontinuidades presentes a lo largo de toda la masa de roca.

La excavación del talud de diseño en el margen izquierdo de la central hidroeléctrica la Yesca, se encuentra alojada sobre varias familias geológicas, entre las principales tenemos (Figura 4.2- 4.3):

Qdt.- Depósito de talud.

Tmbr.- Ignimbrita riolitica brechoide.

Tmts.- Toba vítrea desvitrificada.

Qlp.- Toba pumítica y depósitos pumíticos lacustres.

Tmid.- Ignimbrita intrusionada por diques rioliticos, andeciticos, y diabasicos.

Tmird.- Dacita Fluidal.

De las cuales las más predominantes son:

Dacita-Riolita Brechoide en la parte superior del talud y Dacita Descomprimida en la parte inferior del talud, ambas familias litológicas con mala calidad de roca.

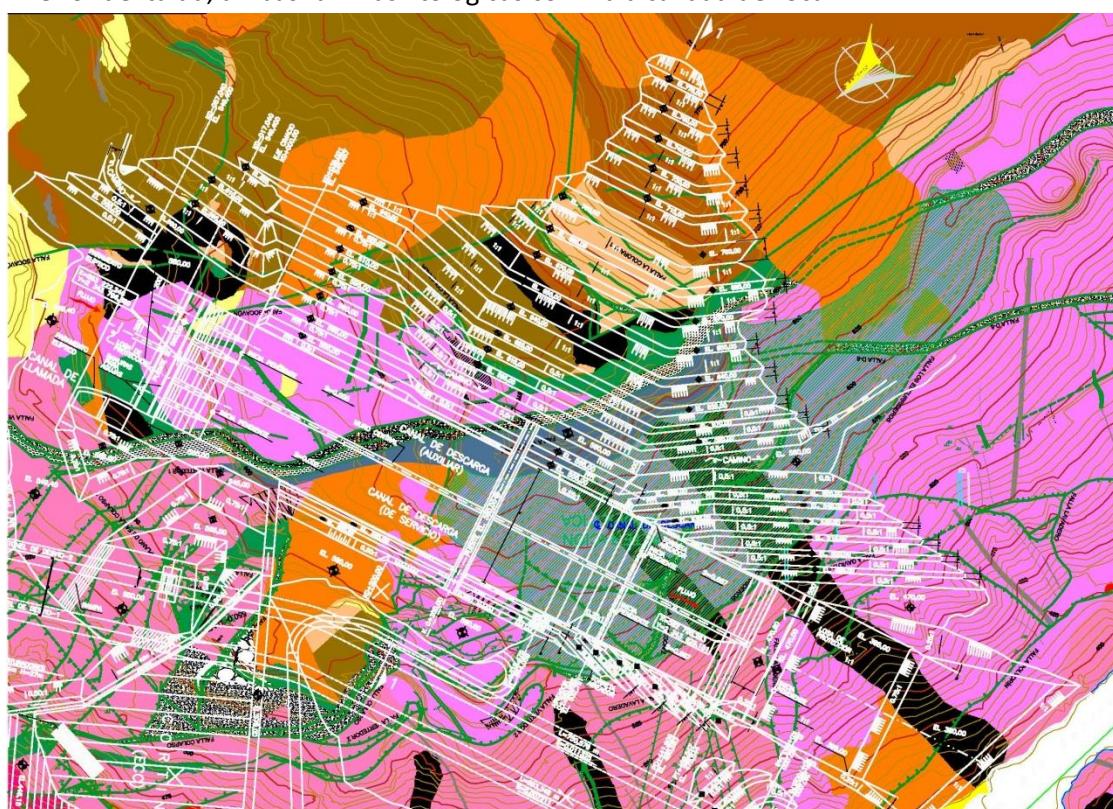


Figura 4.3. Talud de diseño junto a la geología del sitio

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE.

A partir de los datos que se tiene acerca de los sistemas de fracturamiento se realizarán diversos análisis con las posibles combinaciones de fallas y fracturas que limitan a las estructuras geológicas para poder así determinar la formación de las cuñas que puedan presentarse en los tres taludes generales propuestos inicialmente.

A partir de estos análisis se determinará para cada estructura la cuña crítica, es decir, la cuña que presentó las mayores dimensiones y el menor factor de seguridad. En los párrafos siguientes se detallara el proceso de análisis.

Estos análisis se realizarán con el apoyo del programa realizado en Matlab, y el programa Swedge para la verificación de los resultados, ambos programas nos permitirán determinar el factor de seguridad en condiciones estáticas, con sismo y con presión hidrostática en las juntas y en los planos de debilidad.

El análisis realizado indica la presencia de 4 sistemas de fracturamiento (Sistema 1, Sistema 2, Sistema 3, Sistema 4), la estratificación y el sistema LV (Lavadero).

Sistema	Rumbo/Echado
Sistema 1	N34W / 66NE
Sistema 2	N45E / 57SE
Sistema 3	N82W / 76NE
Sistema 4	N10E / 59SE
Estratificación	N36W / 46SW
Falla lavadero LAV	N25E / 65NW

Tabla 4.3 Rumbos y echados de los sistemas de fracturamiento existentes.

Con las orientaciones de las familias de discontinuidades y con ayuda de la proyección estereográfica, se pudo identificar las posibles fallas que se puedan presentar, integrando a estas proyecciones, las direcciones y los echados de cada uno de los tres taludes a analizar. Mencionadas estereografías se las muestra a continuación (Figura 4.4, 4.5 y 4.6):

4.1.1 Talud General 1.-

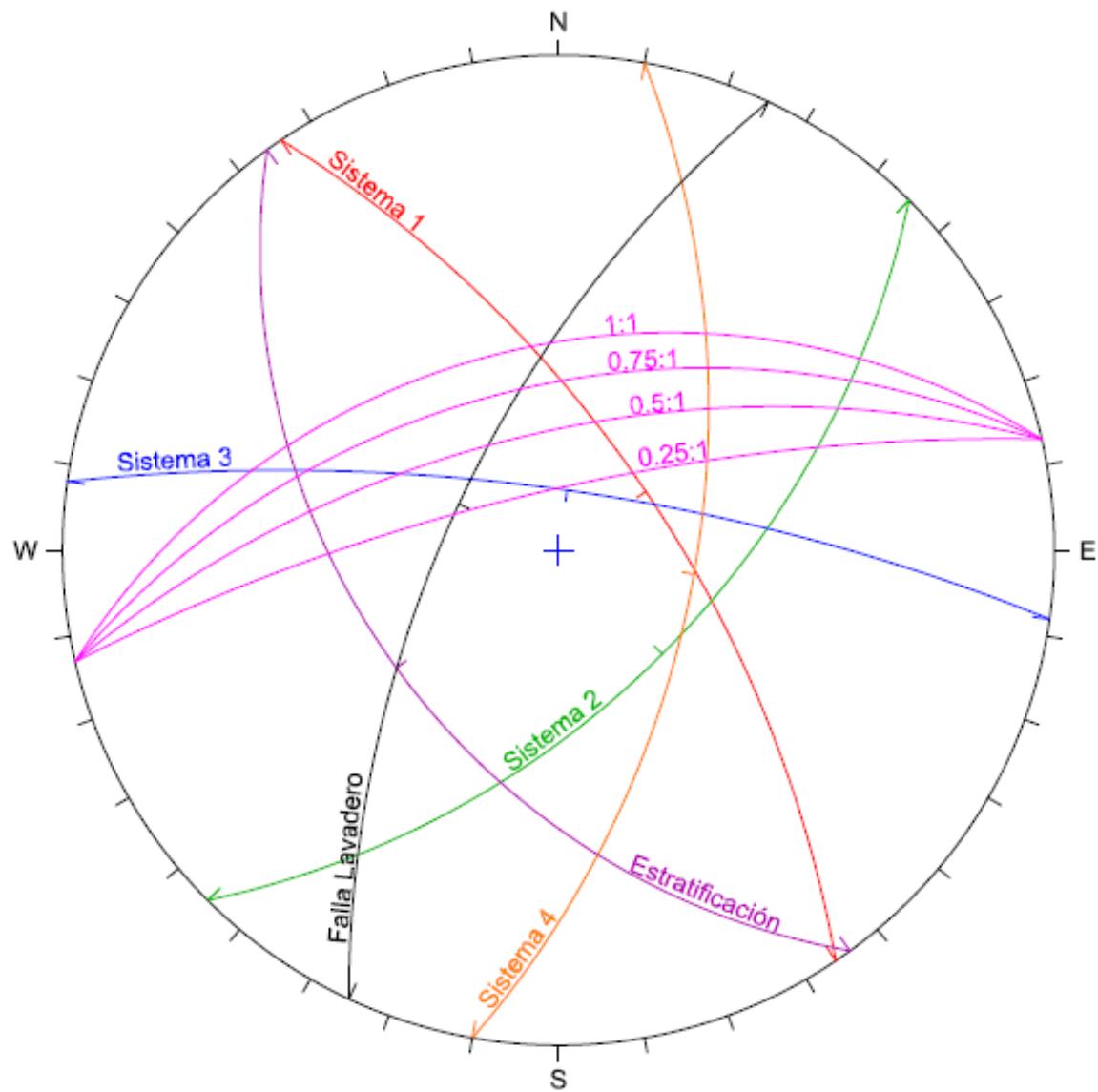


Figura 4.4. Estereografía - Talud General 1

En el talud general 1 el cual tiene una dirección de echado de 347.2, se identificaron los planos que forman las cuñas para distintos echados propuestos, como se muestra en el siguiente cuadro:

Talud	Dirección y echado	Discontinuidades formadores de cuña
G1	347.2 / 45 (1:1)	S4-LV
	347.2 / 53 (0.75:1)	S1-LV, S4-LV
	347.2 / 63 (0.5:1)	S1-LV, S4-LV, S3-EST
	347.2 / 75 (0.25:1)	S1-LV, S3-LV, S4-LV, S3-EST

Tabla 4.4 Fallas en cuña talud general 1

Por medio de la estereografía se puede apreciar que si consideramos el análisis de estabilidad con un talud 0.25:1, se tendrían muchos problemas debido al número de cuñas que se pueden formar y al tamaño de estas, aumentando así los costos de estabilización de los taludes. Todas las posibles cuñas que se puedan presentar en el talud general 1 se presentan en la propuesta de echado 0.25:1 y solamente la combinación S3-LV desaparece al inclinar el talud 0.50:1, Descartando por estos motivos el uso de la propuesta 0.25:1. También se puede apreciar que el talud más desfavorable será el formado por la falla Lavadero y el sistema 4, debido a que ella se presenta en todas las propuestas de talud.

4.1.2 Talud General 2.-

En el talud general 2 el cual tiene una dirección de echado de 338.6, se identificaron los planos que forman las cuñas para distintos echados propuestos, como se muestra en el siguiente cuadro:

Talud	Dirección y echado	Discontinuidades formadores de cuña
G2	338.6 / 45 (1:1)	LV-S4
	338.6 / 53 (0.75:1)	LV-S4 , LV-S1, EST-S3
	338.6 / 63 (0.5:1)	LV-S4 , LV-S1, EST-S3
	338.6 / 75 (0.25:1)	LV-S4 , LV-S1, EST-S3, LV-S3

Tabla 4.5 Fallas en cuña talud general 2

Al igual que en el talud general 1 la intersección entre los planos LV-S4, predomina en las cuatro propuestas realizadas, y es solo en la propuesta 0.25:1 aparece la cuña formada por los planos LV-S3, la intersección LV-S1 afecta a todas las propuestas en excepción del echado 1:1, el hecho de que la falla lavadero esté presente en todas las formaciones de las cuñas está ligado al paso casi perpendicular de la misma por todos los sistemas de fracturamiento y del talud mismo.

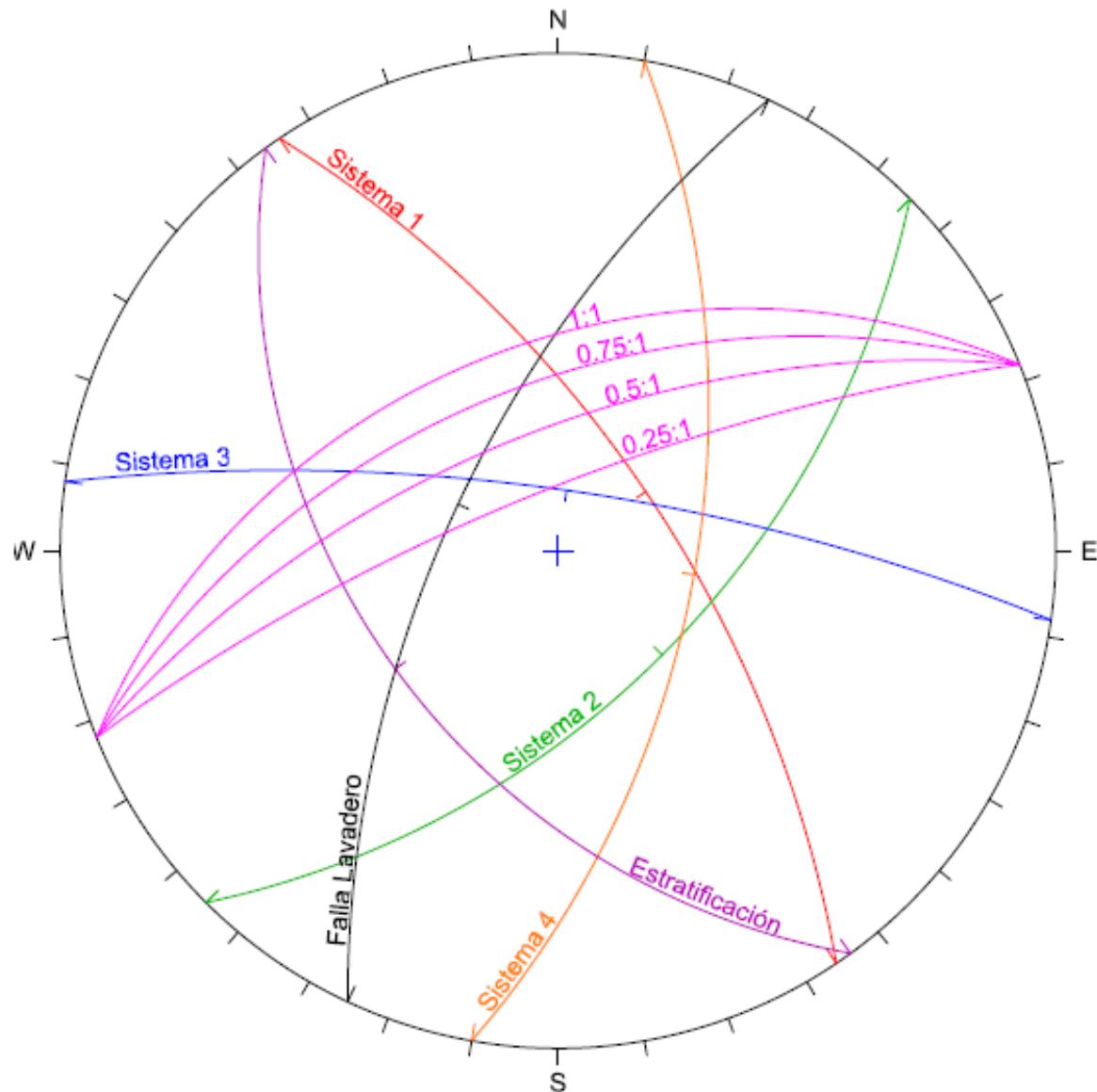


Figura 4.5. Estereografía - Talud General 2

4.1.3 Talud General 3.-

En el talud general 3 el cual tiene una dirección de echado de 306.1, se identificaron los planos que forman las cuñas para distintos echados propuestos, como se muestra en el siguiente cuadro:

Talud	Dirección y echado	Discontinuidades formadores de cuña
G3	306.1 / 45 (1:1)	EST-S3, LV-S4
	306.1 / 53 (0.75:1)	EST-S3, LV-S4
	306.1 / 63 (0.5:1)	EST-S3, LV-S4, LV-S1
	306.1 / 75 (0.25:1)	ES-S3, LV-S4, LV-S1, LV-S3

Tabla 4.6 Fallas en cuña talud general 3

Las cuñas que se forman en todos los taludes propuestos son EST-S3 y LV-S4, presentándose de igual manera la intersección entre los planos LV-S1 solo para los taludes 0.25:1 y 0.5:1. Las cuñas críticas se comportan como falla plana a través del sistema LV acotado por los sistemas 3 y 1 (cuña inversa) para los taludes 0.25:1 y 0.50:1 respectivamente, como se indica en la figura 4.4.

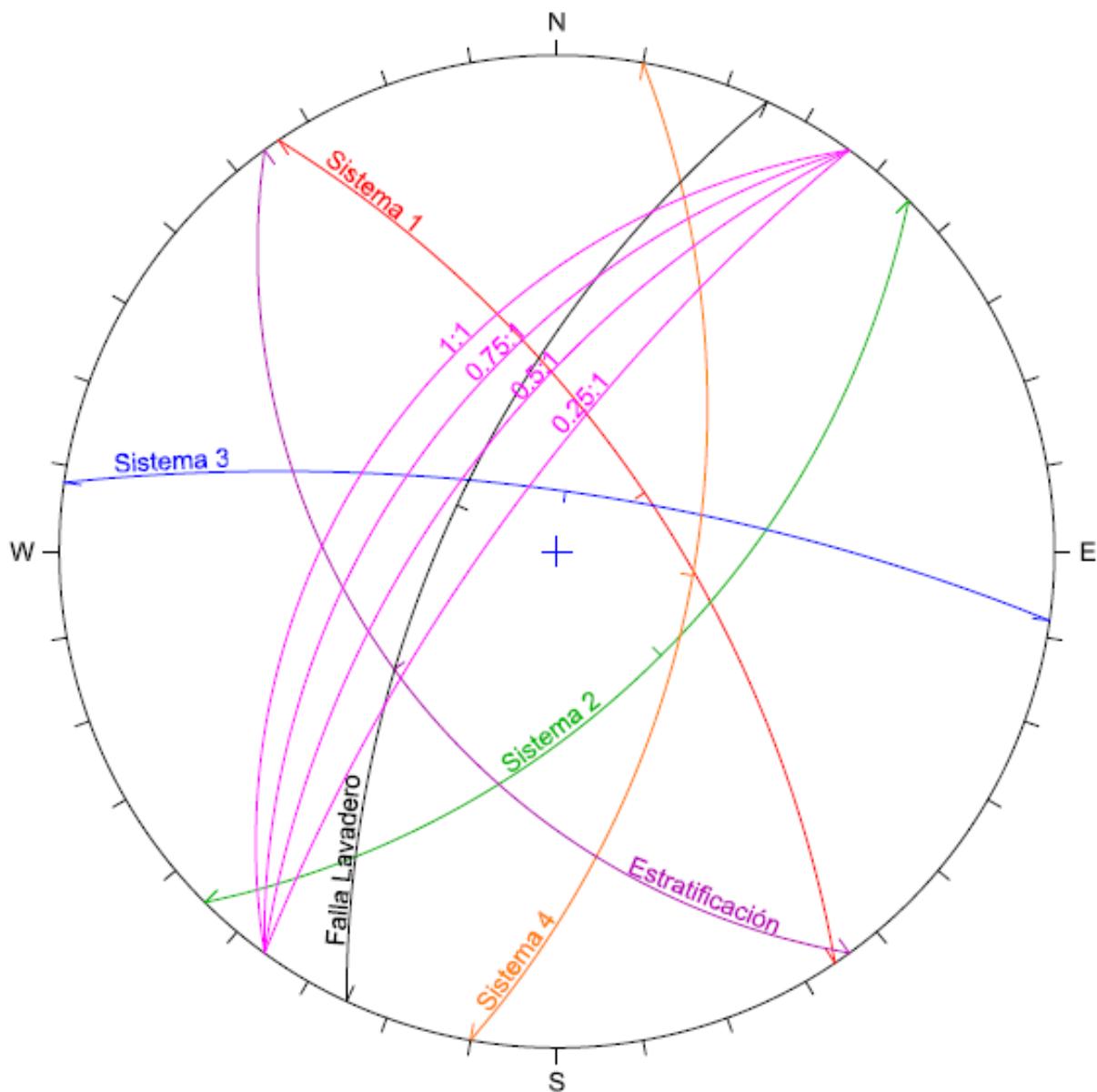


Figura 4.6. Estereografía - Talud General 3

4.1.4 Conclusiones generales de taludes

Con el análisis de estabilidad preliminar por medio de estratigrafía para los tres taludes propuestos originalmente, empleando las direcciones de los 4 sistemas de discontinuidades, la dirección de la falla lavadero y la dirección de la seudoestratigrafía, la geometría propuesta del talud se basara en las propuesta de echados 1:1, 0.75:1 y 0.5:1, la altura de los taludes intermedios será de 15mts entre los cuales se diseñara bermas de 6mts (Figura 4.7).

Se excavará taludes 0.50:1 y 0.75:1 horizontal: vertical hasta la elevación 625.0 esto debido a que la roca en esta zona en su mayoría es dacita fluidal fuertemente silicificada debido a la alteración hidrotermal que ha sellado gran parte de las discontinuidades, generando así una roca muy dura, aceptando de esta manera pendientes mayores y evitando volúmenes considerables en la excavación (Figura 4.7).

A partir de la elevación 625 se usaran taludes 1:1 horizontal: vertical, hasta la elevación 775.0 debido a que en la zona superior del talud de diseño tenemos unidades geológicas tales como Tmts, Tmbr, Qlp y Qdt, , las cuales presenta variación o transiciones de pendientes siguiendo la traza de la Falla Vertedor 1, y todas las unidades a excepción de la ignimbrita toba brechoide (Tmbr), son rocas de mala calidad y suelos provenientes de la desintegración de las mismas, estos materiales no son aptos para construcciones y no necesitaran de explosivos para ser excavados (Figura 4.7).

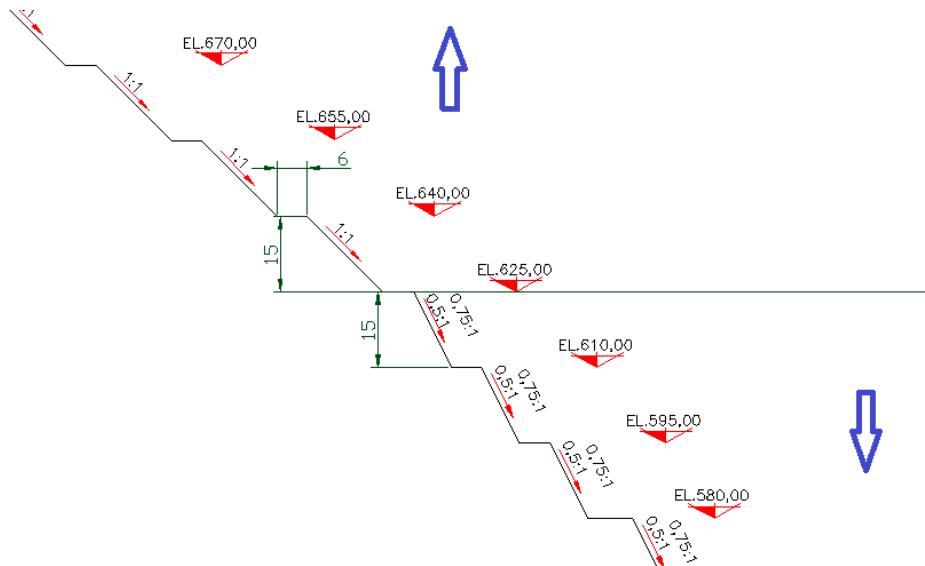


Figura 4.7. Geometría propuesta para el talud de diseño

Una vez analizado el modelo geológico – geotécnico de las posibles fallas por cuña que se presentaran en el talud de diseño, se analizarán para cada una de las cuñas las siguientes condiciones:

- a) Factor de seguridad estático
- b) Factor de seguridad estático con sismo (en dirección más desfavorable)
- c) Factor de seguridad estático con sismo con fracturas rellenas en un 100% de agua.

Para el caso b y c en donde se analizaran cuñas con efectos de sismo en la dirección más desfavorable (Dirección de buzamiento igual a la de la línea de intersección de los planos de falla), se considerara la fuerza desestabilizadora de sismo con aceleración igual a 0.18, por lo que el valor empleado para la fuerza, será 0.18 veces el peso del bloque deslizante.

4.2 Análisis de taludes en roca - falla por cuña

Con base en los sistemas de fracturamiento presentes en el talud izquierdo de la Presa la Yesca, se llevó a cabo el análisis geológico estructural, para cada talud propuesto, analizándose todas las combinaciones posibles de fracturas que permitieron definir distintas cuñas a formarse.

Como se mencionó anteriormente el análisis se lo realizo con el apoyo del programa realizado en el programa MatLab, el cual se basa en la teoría de equilibrio límite propuesta por Evert Hoek y John W. Bray, esta teoría hace la confrontación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes. Mencionado programa nos permite medir la geometría de la cuña, área, volumen y el factor de seguridad.

Para el análisis de equilibrio límite se emplearon parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de las discontinuidades, obtenidos por medio de pruebas de corte directo del Informe 06/081/SGM/R - CFE., los cuales se los detalla para cada sistema en la tabla 4.7.

En el análisis de las cuñas los datos a ingresar al programa serán:

- Altura del Talud, dependerá de la longitud de las discontinuidades presentes
- Peso específico del agua 1 T/m³
- Peso específico del material 2.557T/m³

Sistema	Continuidad	ϕ (°)	Cohesión (t/m ²)
Estratificación	60.00 m o más hasta perderse en los depósitos disgregables.	36	12.7
Sistema 1	0.6 a 10.0 mts o más hasta perderse en los depósitos disgregables.	35	5.0
Sistema 2	0.30 a 7.00 m hasta perderse en los depósitos disgregables.	36	12.7
Sistema 3	0.02 a 8.00 m	29	5.4
Sistema 4	0.10 a 12.00 m	35	5.0
Falla Lavadero	200.00	35	5.0

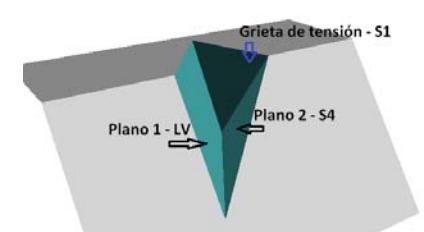
Tabla 4.7 Parámetros de resistencia de las fallas.

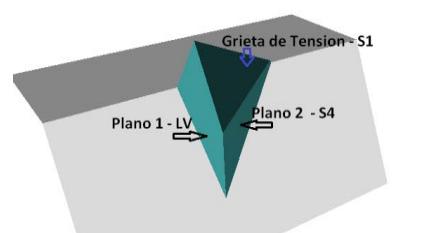
Fuente.- Informe 06/081/SGM/R – CFE

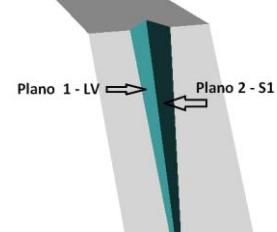
A continuación se detallaran los datos necesarios, que necesita el programa por cada talud en cuña que se analizará en cada uno de los tres taludes generales, las alturas de las mismas se las determino basándose en la longitud máxima del sistema de fracturamiento con la menor longitud de continuidades que forman el talud en cuña.

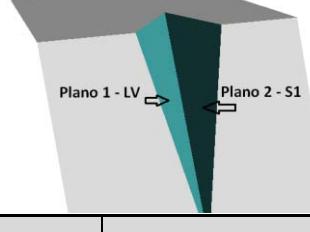
4.2.1 Datos talud general 1

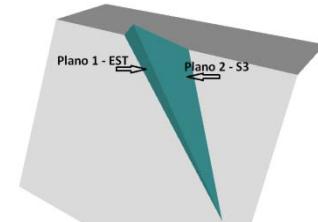
TALUD GENERAL 1 - 1:1 - S4-LV			
Altura (m)	10.28 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	10.00 m		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (t/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	59 / 100	35	5
Grita de tensión	66 / 56 (S1)	-----	-----
Cara del talud	53 / 347.2	-----	-----
Corona del talud	0 / 167.2	-----	-----

TALUD GENERAL 1 - 0.75:1 - S4-LV			
Altura (m)	10.28 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	11.00 m		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	59 / 100	35	5
Grita de tensión	66 / 56 (S1)	-----	-----
Cara del talud	53 / 347.2	-----	-----
Corona del talud	0 / 167.2	-----	-----

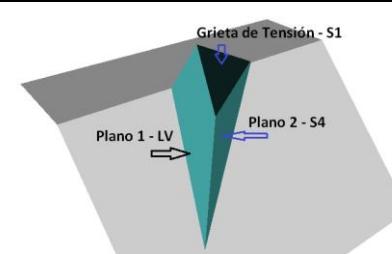
TALUD GENERAL 1 - 0.50:1 - S4-LV			
Altura (m)	10.28 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	12.00 m		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	59 / 100	35	5
Grita de tensión	66 / 56 (S1)	-----	-----
Cara del talud	53 / 347.2	-----	-----
Corona del talud	0 / 167.2	-----	-----

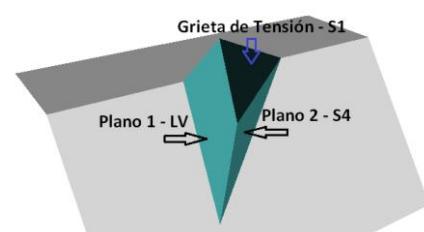
TALUD GENERAL 1 - 0.75:1 - S1-LV			
Altura (m)	9.14 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	-----		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	66 / 56	35	5
Grita de tensión	-----	-----	-----
Cara del talud	53 / 347.2	-----	-----
Corona del talud	0 / 167.2	-----	-----

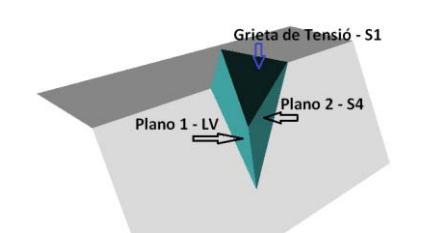
TALUD GENERAL 1 - 0.50:1 - S1-LV			
Altura (m)	9.14 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	-----		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	66 / 56	35	5
Grita de tensión	-----	-----	-----
Cara del talud	63 / 347.2	-----	-----
Corona del talud	0 / 167.2	-----	-----

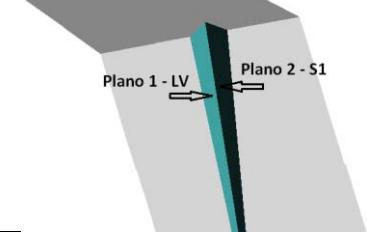
TALUD GENERAL 1 - 0.50:1 - S3-EST			
Altura (m)	7.76 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	-----		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	46/234	36	12.7
Plano 2	76/8	29	5.4
Grita de tensión	-----	-----	-----
Cara del talud	63 / 347.2	-----	-----
Corona del talud	0 / 167.2	-----	-----

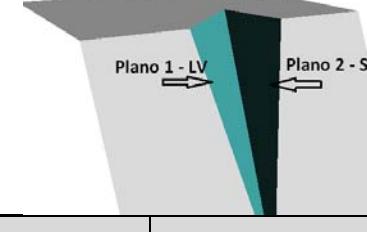
4.2.2 Datos talud General 2

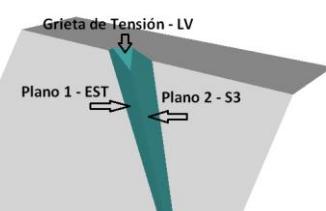
TALUD GENERAL 2 - 1:1 - S4-LV			
Altura (m)	10.28 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	11.50 m		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	59 / 100	35	5
Grita de tensión	66 / 56 (S1)	-----	-----
Cara del talud	45 / 338.6	-----	-----
Corona del talud	0 / 158.6	-----	-----

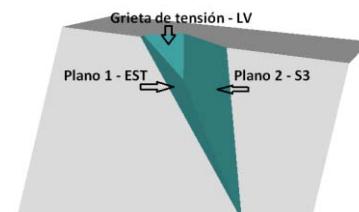
TALUD GENERAL 2 - 0.75:1 - S4-LV			
Altura (m)	10.28 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	12.50 m		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	59 / 100	35	5
Grieta de tensión	66 / 56 (S1)	-----	-----
Cara del talud	53 / 338.6	-----	-----
Corona del talud	0 / 158.6	-----	-----

TALUD GENERAL 2 - 0.50:2 - S4-LV			
Altura (m)	10.28 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	13.60 m		
Planos	0	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	59 / 100	35	5
Grieta de tensión	66 / 56 (S1)	-----	-----
Cara del talud	63 / 338.6	-----	-----
Corona del talud	0 / 158.6	-----	-----

TALUD GENERAL 2 - 0.75:1 - S1-LV			
Altura (m)	9.14 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	-----		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	66 / 56	35	5
Grieta de tensión	-----	-----	-----
Cara del talud	53 / 338.6	-----	-----
Corona del talud	0 / 158.6	-----	-----

TALUD GENERAL 2 - 0.50:1 - S1-LV			
Altura (m)	9.14 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	-----		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	66 / 56	35	5
Grieta de tensión	-----	-----	-----
Cara del talud	63 / 338.6	-----	-----
Corona del talud	0 / 158.6	-----	-----

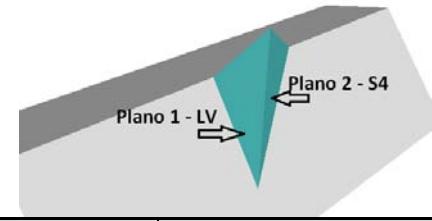
TALUD GENERAL 2 - 0.75:1 - S3-EST			
Altura (m)	7.76 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	0.10 m		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	46/234	36	12.7
Plano 2	76/8	29	5.4
Grieta de tensión	65/295 (LV)	-----	-----
Cara del talud	53 / 338.6	-----	-----
Corona del talud	0 / 158.6	-----	-----

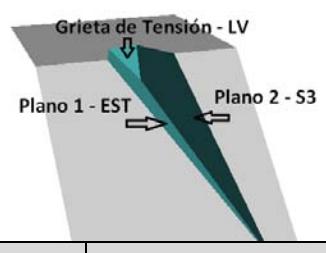
TALUD GENERAL 2 - 0.50:1 - S3-EST			
Altura (m)	7.76 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	0.10 m		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	46/234	36	12.7
Plano 2	76/8	29	5.4
Grieta de tensión	65/295 (LV)	-----	-----
Cara del talud	63 / 338.6	-----	-----
Corona del talud	0 / 158.6	-----	-----

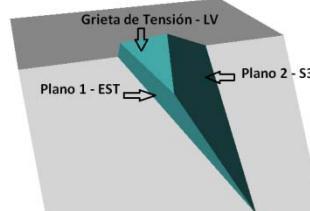
4.2.3 Datos talud General 3

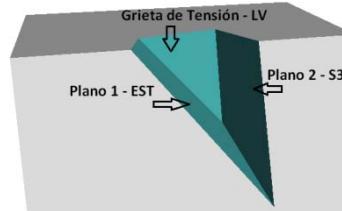
TALUD GENERAL 3 - 1:1 - S4-LV			
Altura (m)	10.28 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	-----		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	59 / 100	35	5
Grieta de tensión	-----	-----	-----
Cara del talud	45 / 306.1	-----	-----
Corona del talud	0 / 126.1	-----	-----

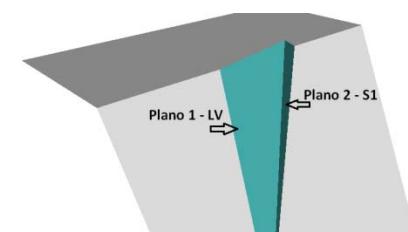
TALUD GENERAL 3 - 0.75:1 - S4-LV			
Altura (m)	10.28 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	-----		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	59 / 100	35	5
Grieta de tensión	-----	-----	-----
Cara del talud	53 / 306.1	-----	-----
Corona del talud	0 / 126.1	-----	-----

TALUD GENERAL 3 - 0.50:2 - S4-LV			
Altura (m)	10.28 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	-----		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	59 / 100	35	5
Grieta de tensión	-----	-----	-----
Cara del talud	63 / 306.1	-----	-----
Corona del talud	0 / 126.1	-----	-----

TALUD GENERAL 3 - 1:1 - S3-EST			
Altura (m)	7.76 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	1.50 m		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	46/234	36	12.7
Plano 2	76/8	29	5.4
Grieta de tensión	65/295 (LV)	-----	-----
Cara del talud	45 / 306.1	-----	-----
Corona del talud	0 / 126.1	-----	-----

TALUD GENERAL 3 - 0.75:1 - S3-EST			
Altura (m)	7.76 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	1.50 m		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	46/234	36	12.7
Plano 2	76/8	29	5.4
Grieta de tensión	65/295 (LV)	-----	-----
Cara del talud	53 / 306.1	-----	-----
Corona del talud	0 / 126.1	-----	-----

TALUD GENERAL 3 - 0.50:1 - S3-EST			
Altura (m)	7.76 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	2.00 m		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	46/234	36	12.7
Plano 2	76/8	29	5.4
Grieta de tensión	65/295 (LV)	-----	-----
Cara del talud	63 / 306.1	-----	-----
Corona del talud	0 / 126.1	-----	-----

TALUD GENERAL 3 - 0.50:1 - S1-LV			
Altura (m)	9.14 m	Representación Grafica	
γw (T/m ³)	1		
γ roca (T/m ³)	2.55		
Distancia de grieta sobre el plano 1	-----		
Planos	Echado / Dirección de echado	ϕ (°)	C (T/m ²)
Plano 1	65 / 295	35	5
Plano 2	66 / 56	35	5
Grieta de tensión	-----	-----	-----
Cara del talud	63 / 306.1	-----	-----
Corona del talud	0 / 126.1	-----	-----

4.2.4 Resumen de Factores de Seguridad para los 4 casos propuestos

Tabla resumen de factores de seguridad										
Talud	Pisos que forman el Talud	Echado de la cara del Talud	Altura	Área Plano 1 (m ²)	Área Plano 2 (m ²)	Área de la Grieta (m ²)	Peso (Ton)	Fuerza Extrema (W*0.18)	FS- Estático	FS- Estático + Agua + Sismo
General 1	LV (65/295) - S4 (59/100)	1:1 - (45°)	10.28 m	98.78 m ²	55.53 m ²	31.54 m ²	551.11 Ton	99.200 Ton	11.806	7.100
	0.75:1 - (53°)			99.37 m ²	49.05 m ²	38.04 m ²	609.92 Ton	109.786 Ton	11.035	6.216
	0.5:1 - (63°)			98.43 m ²	40.65 m ²	45.05 m ²	659.12 Ton	118.641 Ton	10.355	5.434
	EST (46/234) - S3 (76/8)	0.75:1 - (53°)	9.14 m	9.57 m ²	8.05 m ²	----	10.19 Ton	1.834 Ton	12.8428	0
General 2	S1 (66/56)	0.5:1 - (63°)	23.80 m ²	20.01 m ²	----	----	63.03 Ton	11.345 Ton	5.7979	2.2293
	EST (46/234) - S3 (76/8)	0.5:1 - (63°)	7.76 m	13.01 m ²	24.97 m ²	----	35.83 Ton	6.449 Ton	17.5389	7.731
	LV (65/295) - S4 (59/100)	1:1 - (45°)	10.28 m	110.56 m ²	62.80 m ²	25.97 m ²	577.71 Ton	103.988 Ton	12.229	8.136
	0.75:1 - (53°)			111.75 m ²	54.97 m ²	33.23 m ²	646.59 Ton	116.385 Ton	11.341	6.992
General 3	0.5:1 - (63°)			111.50 m ²	45.36 m ²	40.95 m ²	707.56 Ton	127.360 Ton	10.580	6.041
	LV (65/295) - S1 (66/56)	0.75:1 - (53°)	9.14 m	9.06 m ²	6.35 m ²	----	7.61 Ton	1.370 Ton	14.8538	0
	0.5:1 - (63°)			25.37 m ²	17.78 m ²	----	59.69 Ton	10.744 Ton	5.987	2.1289
	EST (46/234) - S3 (76/8)	0.75:1 - (53°)	7.76 m	8.60 m ²	13.99 m ²	1.09 m ²	16.15 Ton	2.906 Ton	23.3323	21.786
General 4	0.5:1 - (63°)			13.19 m ²	25.37 m ²	4.65 m ²	58.98 Ton	10.617 Ton	11.4668	9.8107
	LV (65/295) - S4 (59/100)	1:1 - (45°)	10.28 m	72.55 m ²	33.57 m ²	----	81.17 Ton	14.611 Ton	33.428	4.734
	0.75:1 - (53°)			147.18 m ²	68.10 m ²	----	324.06 Ton	60.131 Ton	19.476	16.222
	0.5:1 - (63°)			221.08 m ²	102.29 m ²	----	753.73 Ton	135.672 Ton	14.943	12.777
General 5	EST (46/234) - S3 (76/8)	1:1 - (45°)	7.76 m	18.68 m ²	15.42 m ²	2.35 m ²	40.81 Ton	7.346 Ton	16.5497	15.1429
	0.75:1 - (53°)			21.46 m ²	18.62 m ²	7.16 m ²	75.93 Ton	13.667 Ton	10.9971	8.9577
	0.5:1 - (63°)			23.39 m ²	21.24 m ²	12.42 m ²	120.22 Ton	21.639 Ton	8.184	6.1296
	LV (65/295) - S1 (66/56)	0.5:1 - (63°)	9.14 m	24.42 m ²	4.96 m ²	----	16.02 Ton	2.884 Ton	13.5525	1.0344

Tabla 4.8 Resumen de los factores de seguridad de taludes.

A partir de un primer análisis de las condiciones de equilibrio límite de los taludes analizados se considera que los bloques se mantienen estables con factores de seguridad por encima de los requeridos, cuando solo se lo considera el caso estático, es decir cuando no entran en el análisis las fuerzas sísmicas e hidrostáticas, también se pudo evidenciar las cuñas que presentaron las condiciones de estabilidad por debajo del factor de seguridad requerido, entre los cuales se encontró que son tres taludes, los que no cumplen con las condiciones de seguridad necesarias, en dos de ellos el bloque deslizante dejó de estar en contacto con los planos de deslizamiento, debido a que la fuerza hidrostática era mayor a la ejercida por el peso propio de la cuña sobre los planos. Estos casos serán analizados a continuación para poder ver el tratamiento y la fuerza de anclaje mínima que se necesitará para llegar a estabilizar el mismo.

La tabla 4.9 contiene los resultados que forman las cuñas más desfavorables, es de estos análisis que se obtuvo el diseño de soporte, que más adelante se describe para así poder estabilizar los bloques que podrían deslizar, el cálculo de las cuñas se lo hizo aplicando fuerzas externas contrarias a la resultante de las fuerzas actuantes.

Factores de seguridad menores a los requeridos												
Talud	Planos que forman el Talud	Echado de la cara del Talud	Altura	Área Plano 1 (m ²)	Área Plano 2 (m ²)	Área de la Grieta (m ²)	Peso (Ton)	Fuerza Externa (W*0.18)	FS- Estático	FS- Estático + Agua	FS- Estático - Sismo	FS- Estático + Agua + Sismo
General 1	LV (65/295) - S1 (66/56)	0.75:1 - (53°)	9.14 m	9.57 m ²	8.05 m ²	-----	10.19 Ton	1.834 Ton	12.8428	0	10.3007	0
General 2	LV (65/295) - S1 (66/56)	0.75:1 - (53°)	9.14 m	9.06 m ²	6.35 m ²	-----	7.61 Ton	1.370 Ton	14.8538	0	11.9172	0
General 3	LV (65/295) - S1 (66/56)	0.5:1 - (63°)	9.14 m	24.42 m ²	4.96 m ²	-----	16.02 Ton	2.884 Ton	13.5525	1.0344	10.8712	0.943

Tabla 4.9 Taludes con factores de seguridad menores a los requeridos.

4.3 Análisis del diseño de soporte para taludes con fallas.

Como se puede apreciar en la tabla 4.9 en los dos primeros casos para un talud con un echado 0.75:1 el talud tiene un factor de seguridad de 0 cuando actúa la presión de agua sobre las discontinuidades, esto quiere decir que las fuerzas normales al plano de discontinuidad producidas por la presión de agua son mayores a las fuerzas normales que ejerce el peso del talud. Dando como resultado normales negativas. Este fenómeno produce la no existencia de la fuerza resistente al perderse el contacto entre el talud y los planos de deslizamiento, debido a que entre ambas caras habrá una película de agua la cual no tiene resistencia al corte.

En este caso el programa no nos calcula la fuerza necesaria para evitar el deslizamiento, debido a que este caso es la primera condición que toma en cuenta el programa, terminando el cálculo como se muestra a continuación:

```

'Cálculo del factor de seguridad';
if N1<0 && N2<0
  'FS = 0 , Debido a que se pierde el contacto en ambos planos'
else
  Continúa Cálculo

```

Por lo que para el cálculo de la fuerza necesaria para aguantar esa presión de agua, se la hará de manera matemática, contrarrestando así la fuerza que ejerce el agua sobre los planos de deslizamiento, de esta manera lograremos que el talud se comporte solo estáticamente, el cálculo de la fuerza se lo describe a continuación, con datos extraídos del programa, u1(Presión de agua), Wi (Peso del bloque sobre los planos)

4.3.1 Talud General 1 0.75:1 – Planos de fallas LV-S1

DATOS	
N1:	-8.846 T
N2	-6.654 T
u1:	1.52 T/m ²
Área 1:	9.57 m ²
Área 2 :	8.05 m ²
W:	10.187 T
U1	14.577 T
U2	12.257 T
W1	5.731 T
W2	5.602 T

Donde U1 y U2 son las fuerzas normales que ejerce el agua, y W1 y W2 son las fuerzas normales producidas por el peso del bloque sobre los planos de deslizamiento.

Debido a que buscaremos la fuerza necesaria para contrarrestar la fuerza del agua, del programa se obtendrá los vectores unitarios Normales a los planos de discontinuidad:

- Vector unitario normal al plano 1
 $I_x, I_y, I_z = 0.5483 x, 0.6083 y, 0.5143 z$
- Vector unitario normal al plano 2
 $k_x, k_y, k_z = -0.6286 x, 0.5131 y, 0.5261 z$
- Calculo del vector equipolente de la presión de agua sobre los planos de discontinuidad.

$$U_1 = 7.5666x, 8.3953y, 7.0976z$$

$$U_2 = -6.0816, 4.9636y, 5.0903z$$

- Resultante de la sumatoria de las presiones de agua

$$U = -1.4849x, -13.3588y, -12.1878z$$

$$|U| = 18.144 \text{ Ton}$$

- Dirección de echado y echado de la fuerza que se aplicara

$$\psi = \arcsin(-U_z) = \arcsin\left(-\frac{-12.1878}{18.144}\right) = 42.20^\circ$$

$$\alpha = \tan\left(\frac{U_x}{U_y}\right) = \tan\left(\frac{-1.4849/18.144}{-13.3588/18.144}\right) + 180 = 186.342^\circ$$

4.3.2 Talud General 2 0.75:1 – Planos de fallas LV-S1

DATOS	
N1:	-9.518 T
N2:	-5.488 T
u1:	1.52 T/m ²
Área 1:	9.06 m ²
Área 2 :	6.35 m ²
W:	7.613 T
U1	13.800 T
U2	9.675 T
W1	4.283 T
W2	4.186 T

Donde U1 y U2 son las fuerzas normales que ejerce el agua, y W1 y W2 son las fuerzas normales producidas por el peso del bloque sobre los planos de deslizamiento.

Debido a que buscaremos la fuerza necesaria para contrarrestar la fuerza del agua, del programa se obtendrá los vectores unitarios Normales a los planos de discontinuidad:

- Vector unitario normal al plano 1
 $I_x, I_y, I_z = 0.5483x, 0.6083y, 0.5143z$
- Vector unitario normal al plano 2
 $k_x, k_y, k_z = -0.6286x, 0.5131y, 0.5261z$

- Cálculo del vector equipolente de la presión de agua sobre los planos de discontinuidad.

$$U_1 = 7.9926x, 8.8679y, 7.4972z$$

$$U_2 = -7.7047x, 6.2882y, 6.4487z$$

- Resultante de la sumatoria de las presiones de agua

$$U = -0.2879x, -15.1561y, -13.9459z$$

$$IUI = \textcolor{red}{20.598 \text{ Ton (Fuerza de anclaje necesaria)}}$$

- Dirección de echado y echado de la fuerza que se aplicara

$$\psi = \arcsin(-U_z) = \arcsin\left(-\frac{-13.9459}{20.598}\right) = \textcolor{red}{42.61^\circ}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{U_x}{U_y}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-0.2879/20.598}{-15.1561/20.598}\right) + 180 = \textcolor{red}{181.088^\circ}$$

4.3.3 Talud General 3 0.5:1 – Planos de fallas LV-S1

Este talud nos da factores de seguridad por debajo de los requeridos cuando entra en acción la presión de agua, por lo que con el programa efectuado podremos calcular la fuerza necesaria y la dirección y echado de la misma para llegar a los factores de seguridad requeridos.

Altura del talud: 9.14 mts

Área 1: 24.42 m²

Área 2: 4.96 m²

Peso: 16.02

Caso 1 FS + AGUA

FS Requerido: **1.5**

Fuerza de anclaje: **8.3492 Ton**

Echado: **13.5855°**

Dirección de echado: **140.5453°**

Caso 2 FS + AGUA + SismoFS Requerido: **1.2**Fuerza de anclaje: **5.9222 Ton**Echado: **16.1731°**Dirección de echado: **139.3248°****4.4 Diseño de tratamientos de soporte**

De acuerdo con los resultados del análisis geológico estructural, se llevó a cabo el diseño del soporte requerido, para estabilizar los bloques que potencialmente podrían caerse, aplicándose fuerzas externas contrarias a la resultante de las fuerzas actuantes

Se propone el refuerzo por medio de base de anclas de fricción, el diámetro de las anclas será de Ø16 (16mm), Ø20 (20mm) y Ø25 (25mm).

Cálculo de la tensión del ancla

$$Ta \ Ø16 = As. f_y. fr$$

$$Ta \ Ø16 = (2.010 cm^2) \cdot \left(4200 \frac{kg}{cm^2} \right) \cdot (0.75) = 6333.46 kg = 6.0 Ton$$

$$Ta \ Ø20 = As. f_y. fr$$

$$Ta \ Ø20 = (3.1416 cm^2) \cdot \left(4200 \frac{kg}{cm^2} \right) \cdot (0.75) = 9896.04 kg = 9.8 Ton$$

$$Ta \ Ø25 = As. f_y. fr$$

$$Ta \ Ø25 = (5.067 cm^2) \cdot \left(4200 \frac{kg}{cm^2} \right) \cdot (0.75) = 15961.3 kg = 15.9 Ton$$

Caso 1 - Talud General 1 0.75:1 – Planos de fallas LV-S4

Se necesita una fuerza de anclaje de 18.144 Ton, el área de la cara del talud es de 9.98401 m² (Swedge)

$$esf. actuante = \frac{F \text{ anclaje}}{\text{Área cuña}} = \frac{18.144 \text{ ton}}{9.984 m^2} = 1.8173 \frac{\text{Ton}}{m^2}$$

$$A = \frac{Ta \ Ø25}{\sigma} = \frac{15.6 \text{ Ton}}{1.8173 \frac{\text{Ton}}{m^2}} = 8.75 m^2 \quad \rightarrow \text{Área que soporta la barra de anclaje}$$

La longitud del ancla será proporcional a la altura de la cuña analizada 9.14mts = 10mts

En el caso 1 se colocarán anclajes de diámetro Ø25 (25mm) cada 3.0mts, para poder así cubrir un área de 9.0 m².

Caso 2 - Talud General 2 0.75:1 – Planos de fallas LV-S1

Se necesita una fuerza de anclaje de 20.598 Ton, el área de la cara del talud es de 9.0297 m² (Swedge)

$$esf. actuante = \frac{F \text{ anclaje}}{\text{Área cuña}} = \frac{20.598 \text{ ton}}{9.0297 \text{ m}^2} = 2.2811 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$$

$$A = \frac{Ta \varnothing 25}{\sigma} = \frac{15.9 \text{ Ton}}{2.2811 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}} = 6.97 \text{ m}^2 \quad \rightarrow \text{Área que soporta la barra de anclaje}$$

La longitud del ancla será proporcional a la altura de la cuña analizada 9.14 mts = 10mts

En el caso 2 se colocarán anclajes de diámetro Ø25 (25mm) cada 2.7 mts, para poder así cubrir un área de 7.3m².

Caso 3 - Talud General 3 0.5:1 – Planos de fallas LV-S1

Se necesita una fuerza de anclaje de 8.3492 Ton, el área de la cara del talud es de 22.6416 m² (Swedge)

$$esf. actuante = \frac{F \text{ anclaje}}{\text{Área cuña}} = \frac{8.3492 \text{ ton}}{22.6416 \text{ m}^2} = 0.3687 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$$

$$A = \frac{Ta \varnothing 16}{\sigma} = \frac{6.0 \text{ Ton}}{0.3687 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}} = 16.27 \text{ m}^2 \quad \rightarrow \text{Área que soporta la barra de anclaje}$$

La longitud del ancla será proporcional a la altura de la cuña analizada 9.14 mts = 10mts

En el caso 3 se colocarán anclajes de diámetro Ø16 (16mm) cada 4 mts, para poder así cubrir un área de 16m².

4.5 Cambio de posición de la cortina de la P.H. la Yesca

Debido al cambio de posición de la cortina de la C.H. la Yesca por diversos motivos, el talud de diseño o el talud izquierdo aguas abajo se tuvo que rediseñar al moverse esta 14° hacia el suroeste, de igual manera que en el talud inicial se identificaron los posibles mecanismos de falla que pudieran darse y de esta manera podrían afectar la estabilidad del talud en general. El nuevo talud ubicado en el margen izquierdo del río grande Santiago, tiene distintas direcciones de echado, las cuales se rigieron por la topografía de la zona, como se muestra en la figura 4.8. de igual manera que el talud inicial se compondrá por los taludes intermedios con alturas de 15m y bermas de 6m entre talud y talud.

**Fig. 4.8.** Nueva Zonificación del talud de diseño

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE.

Este nuevo análisis de estabilidad se lo hará por medio de estratigrafía para los taludes propuestos, empleando las direcciones de los 4 sistemas de discontinuidades, la dirección de la falla lavadero y la dirección de la seudoestratigrafía, la geometría propuesta del talud se basara en la propuesta de echados 1:1 y 0.5:1.

Talud	Rumbo/Echado
Talud G4	N30E / 45-63 NW
Talud G5	N60E / 45-63 NW
Talud G6	N45E / 45-63 NW
Talud G7	N15E / 45-63 NW
Talud G8	N89E / 45-63 N

Tabla 4.10 Dirección de echados de taludes generales 4-8

El análisis se hará con la presencia de 4 sistemas de fracturamiento (Sistema 1, Sistema 2, Sistema 3, Sistema 4), la estratificación y el sistema LV (Lavadero), representando sus rumbos y echados en la siguiente tabla.

Sistema de fracturamiento	Rumbo/Echado
Sistema 1	N34W / 66NE
Sistema 2	N45E / 57SE
Sistema 3	N82W / 76NE
Sistema 4	N10E / 59SE
Estratificación	N36W / 46SW
Falla lavadero LAV	N25E / 65NW

Tabla 4.3 Rumbos y echados de los sistemas de fracturamiento existentes.

Con las orientaciones de las familias de discontinuidades y con ayuda de la proyección estereográfica, se pudo identificar las posibles fallas que se puedan presentar, integrando a estas proyecciones, las direcciones y los echados de cada uno de los tres taludes a analizar. Mencionadas estereografías se las muestra a continuación (Figura 4.9- 4.13):

4.5.1 Talud General 4.-

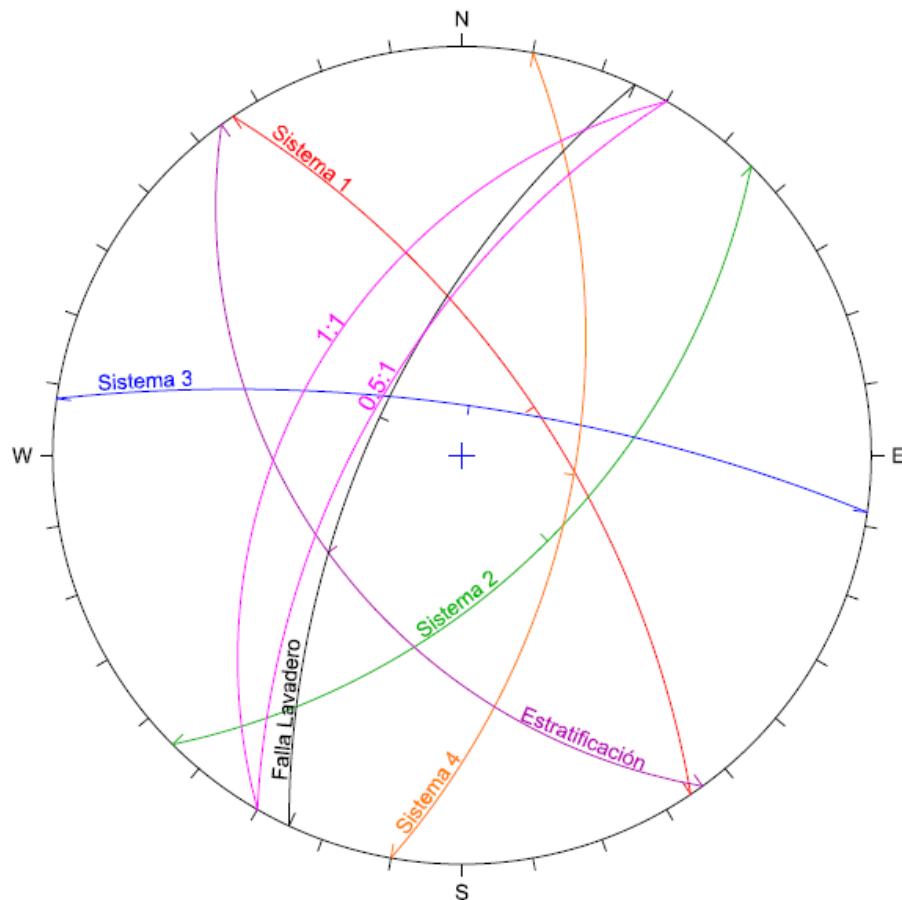


Fig. 4.9 Estereograma - Talud General 4

En el talud general 4 el cual tiene una dirección de echado de 306.1, se identificaron los planos que forman las cuñas para distintos echados propuestos, como se muestra en el siguiente cuadro:

Talud	Dirección y echado	Discontinuidades formadores de cuña
G4	300 / 45 (1;1)	EST-S3
	300 / 63 (0.5:1)	EST-S3, LV-S4

Tabla 4.11 Fallas en cuña talud general 4

La cuña que se forman en los dos taludes propuestos está formada por los sistemas EST-S3, en el talud 05:1 también se presenta la cuña formada por los sistemas LV-S4. La falla más crítica estaría representada por los sistemas EST-S3.

4.5.2 Talud General 5.-

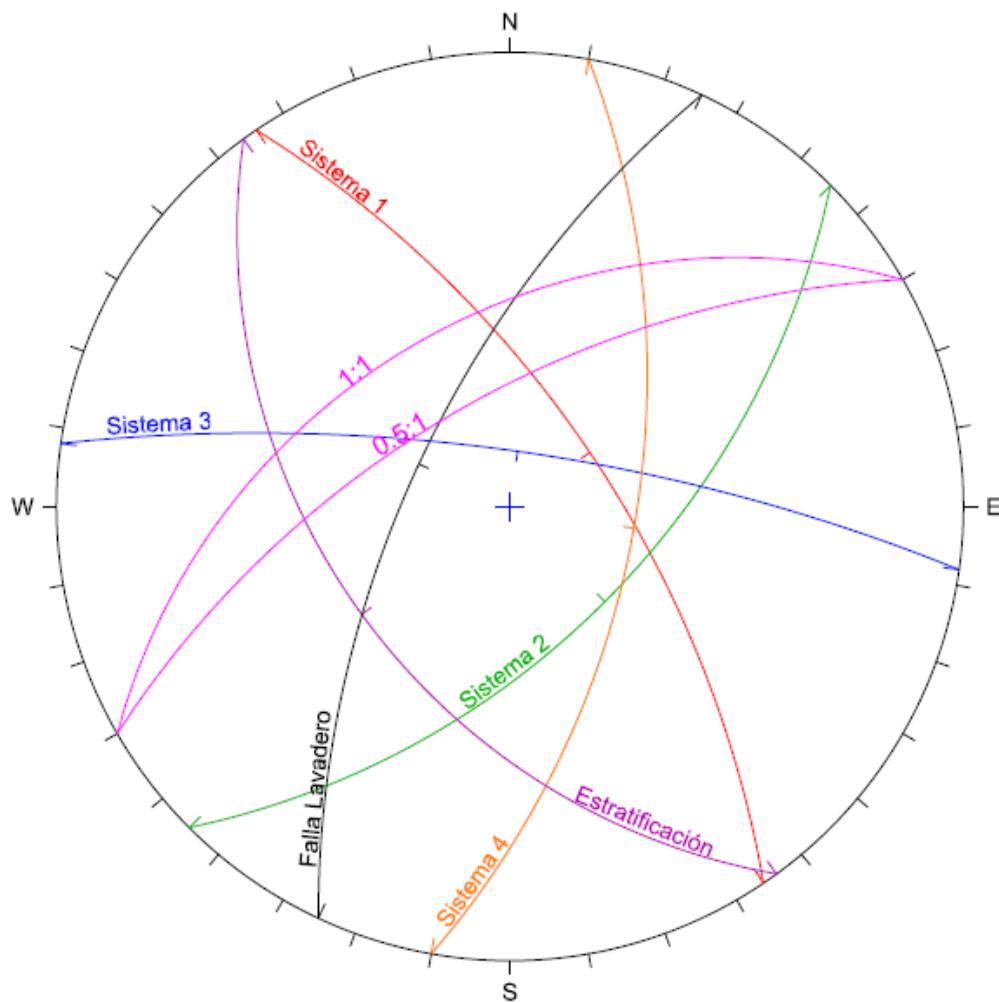


Fig. 4.10. Estereografía - Talud General 5

En el talud general 5 el cual tiene una dirección de echado de 306.1, se identificaron los planos que forman las cuñas para distintos echados propuestos, como se muestra en el siguiente cuadro:

Talud	Dirección y echado	Discontinuidades formadores de cuña
G5	330 / 45 (1;1)	EST-S3, LV-S4
	330 / 63 (0.5:1)	EST-S3, LV-S4, LV-S1

Tabla 4.12 Fallas en cuña talud general 5

Las cuñas que se forman en los dos taludes propuestos son EST-S3 y LV-S4, La cuña crítica se comporta como falla plana a través del sistema LV acotado por los sistemas 3 y 1 para ambos taludes, como se indica en la figura 4.10, también se puede observar que la cuña formada por los planos LV-S1 se pierde al inclinar el echado del talud a 45°.

4.5.3 Talud General 6.-

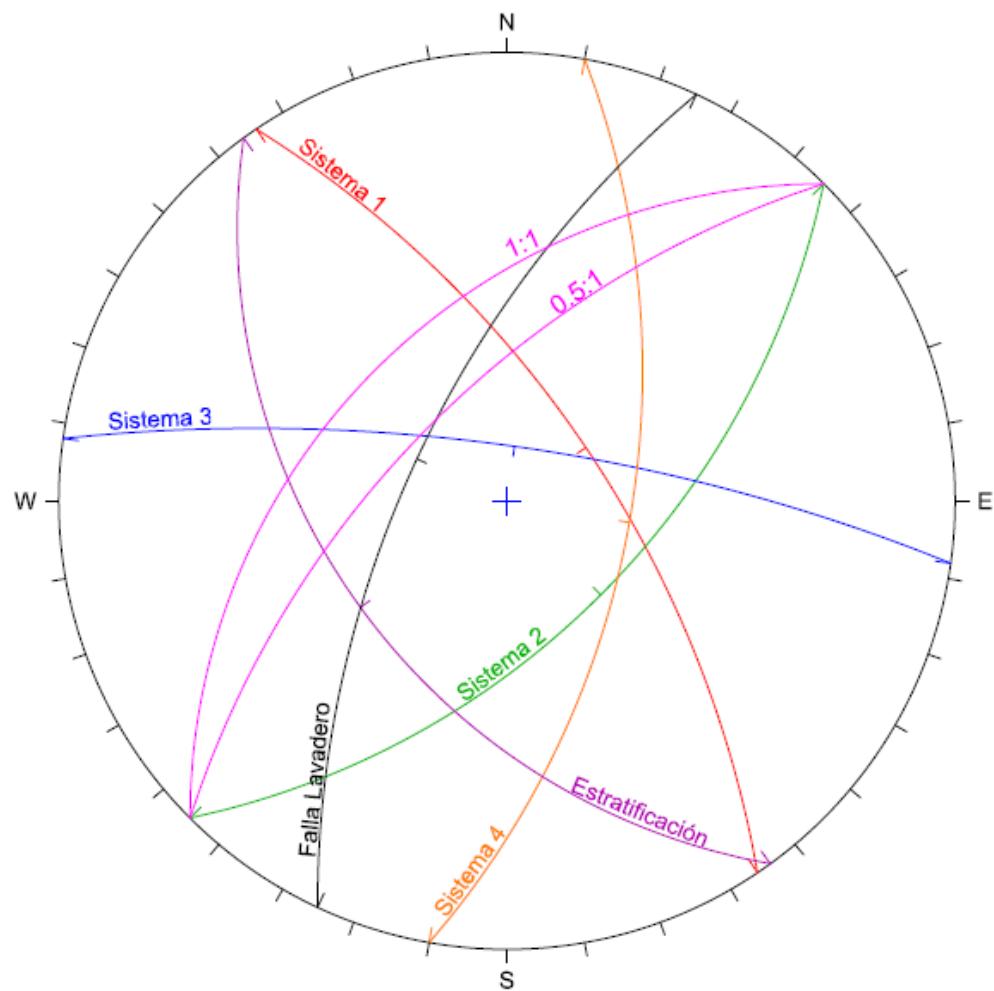


Fig. 4.11. Estereografía - Talud General 6

En el talud general 6 el cual tiene una dirección de echado de 306.1, se identificaron los planos que forman las cuñas para distintos echados propuestos, como se muestra en el siguiente cuadro:

Talud	Dirección y echado	Discontinuidades formadores de cuña
G6	315 / 45 (1:1)	EST-S3, LV-S4
	315 / 63 (0.5:1)	EST-S3, LV-S4, LV-S1

Tabla 4.13 Fallas en cuña talud general 6

Al igual que en el talud 5 las cuñas que se forman en los dos taludes propuestos son EST-S3 y LV-S4, la cuña crítica se comporta como falla plana a través del sistema LV acotado por los sistemas 3 y 1, para ambos taludes, como se muestra en la figura 4.11 también se puede observar que la cuña formada por los planos LV-S1 se pierde al inclinar el echado del talud a 45°.

4.5.4 Talud General 7.-

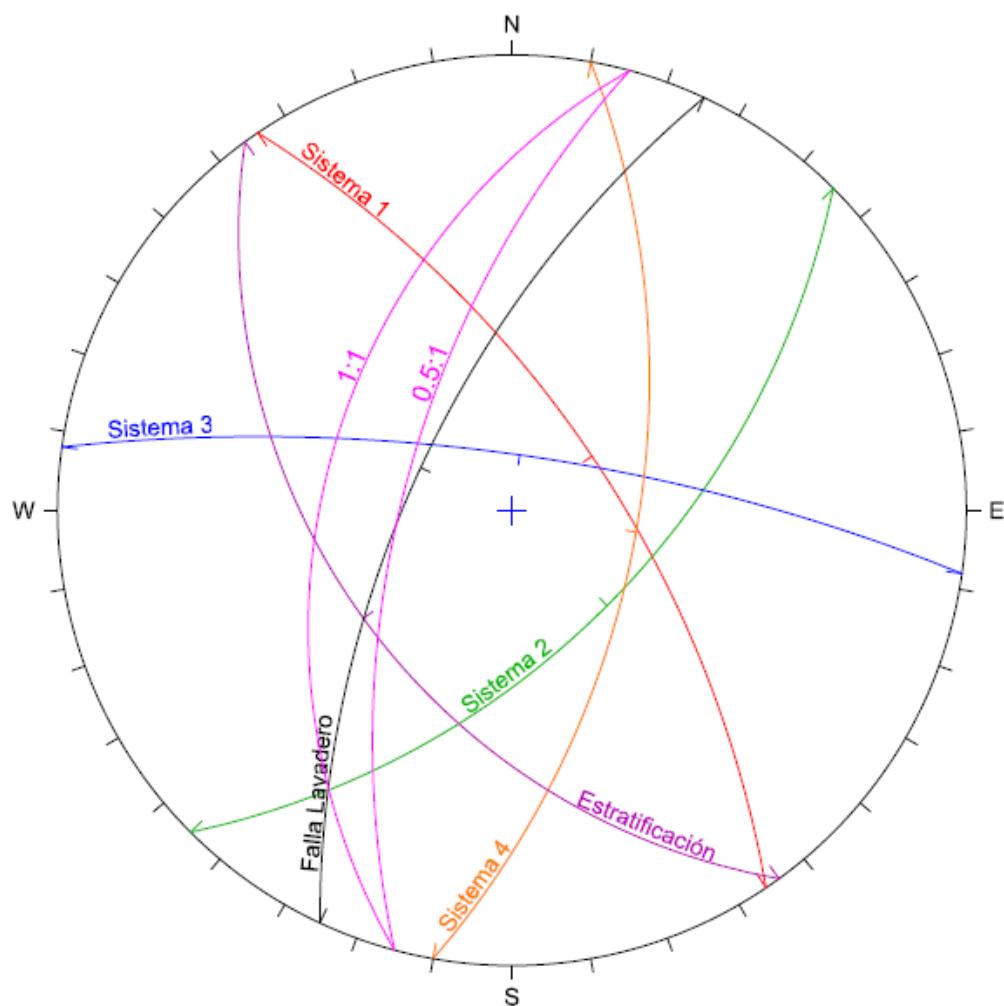


Fig. 4.12. Estereografía - Talud General 7

En el talud general 7 el cual tiene una dirección de echado de 306.1, se identificaron los planos que forman las cuñas para distintos echados propuestos, como se muestra en el siguiente cuadro:

Talud	Dirección y echado	Discontinuidades formadores de cuña
G7	285 / 45 (1:1)	EST-S3
	285 / 63 (0.5:1)	EST-S3

Tabla 4.14 Fallas en cuña talud general 7

La cuña que se forma para el talud general 7, está formada por los sistemas EST-S3 presentándose en ambos taludes propuestos. Figura 4.12.

4.5.5 Talud General 8.-

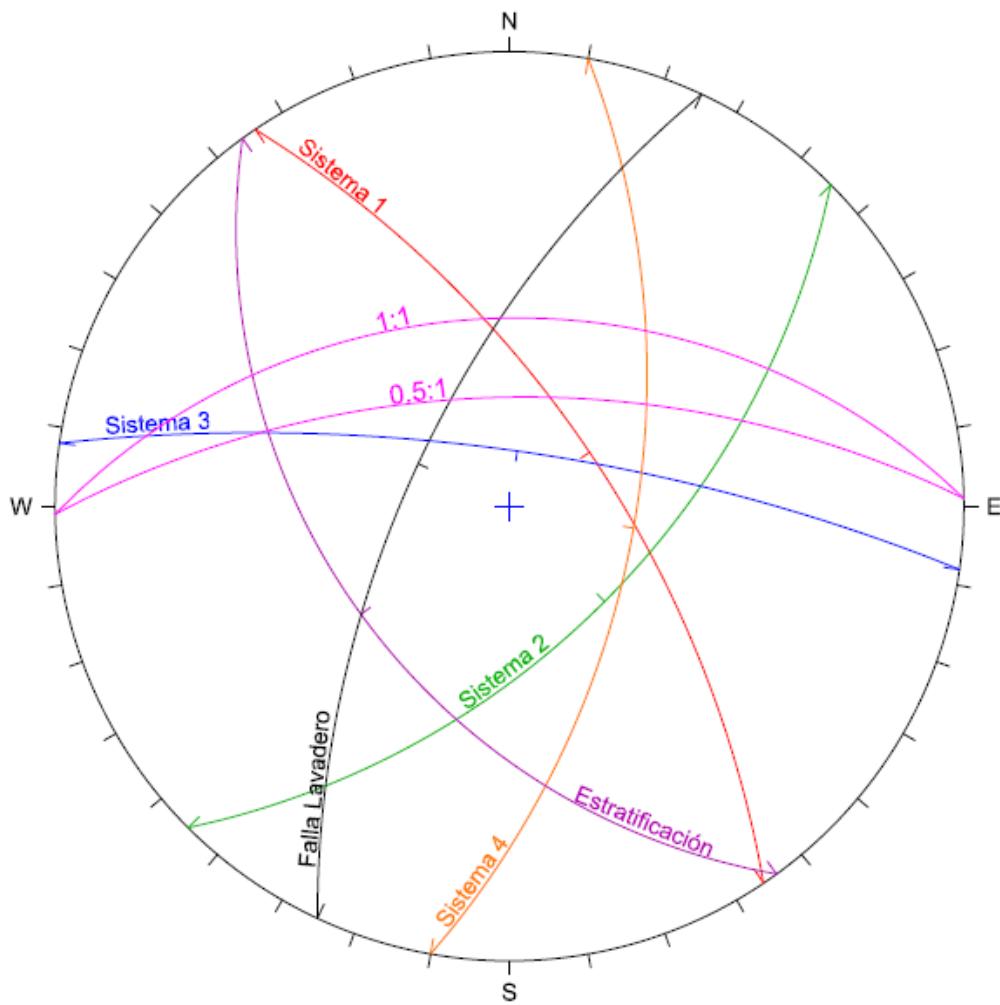


Figura 4.13. Estereografía - Talud General 8

En el talud general 8 el cual tiene una dirección de echado de 306.1, se identificaron los planos que forman las cuñas para distintos echados propuestos, como se muestra en el siguiente cuadro:

Talud	Dirección y echado	Discontinuidades formadores de cuña
G8	359/ 45 (1;1)	LV-S4
	359 / 63 (0.5:1)	LV-S4, LV-S1

Tabla 4.15 Fallas en cuña talud general 8

Debido a que la geometría del talud general 2 se basó en la topografía original de la zona, el talud 8 se lo analizó de manera provisional ya que el cambio de dirección de la central hidroeléctrica la Yesca, ocurrió cuando ya se tenían excavados los taludes intermedios de las cotas superiores, cortes y análisis de estabilidad hechos en el talud de diseño inicial.

La cuña que se forma en los dos taludes provisionales propuestos está formada por las discontinuidades LV-S4, presentándose de igual manera la intersección entre los planos LV-S1 solo para el talud 0.5:1. Figura 4.13.

4.6 Análisis de taludes en roca - falla por cuña

Con base en los sistemas de fracturamiento presentes en el nuevo talud izquierdo de la Presa la Yesca, se llevó a cabo el análisis geológico estructural, para cada talud propuesto, analizándose todas las combinaciones posibles de fracturas que permitieron definir distintas cuñas a formarse.

Como se mencionó anteriormente el análisis se lo realizó con el apoyo del programa realizado en el programa MatLab, el cual se basa en la teoría de equilibrio límite propuesta por Evert Hoek y John W. Bray, esta teoría hace la confrontación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes. Mencionado programa nos permite medir la geometría de la cuña, área, volumen y el factor de seguridad.

Para el análisis de equilibrio límite se emplearon parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de las discontinuidades usados en la sección 4.2 de este mismo capítulo.

Una vez analizado el modelo geológico – geotécnico de las posibles fallas por cuña que se presentaran en el talud de diseño, se analizaran para cada una de las cuñas las siguientes condiciones:

- a) Factor de seguridad estático
- b) Factor de seguridad estático con sismo (en dirección más desfavorable)
- c) Factor de seguridad estático con sismo con fracturas rellenas en un 100% de agua.

Para el caso b y c en donde se analizaran cuñas con efectos de sismo en la dirección más desfavorable (Dirección de buzamiento igual a la de la línea de intersección de los planos de falla), se considerara la fuerza desestabilizadora de sismo con aceleración igual a 0.18, por lo que el valor empleado para la fuerza, será 0.18 veces el peso del bloque deslizante.

4.6.1 Resumen de Factores de Seguridad para taludes Generales 4-8

Tabla resumen de factores de seguridad para diseño del nuevo talud										
Talud	Pisos que forman el Talud P1-P2	Grieta de tensión / Distancia	Echado de la cara de Talud	Altura	Área Plano 1 (m ²)	Área Plano 2 (m ²)	Área de la Grieta (m ²)	Peso (Ton)	Fuerza Externa (W*0.18)	FS- Estático + Agua
General 4 Dir Echado 300°	EST (46/234) - S3 (76/8).	LV (65/295) / 2mts	1:1 - (45°)	7.76 m	21.56 m ²	15.97 m ²	2.48 m ²	48.63 Ton	8.754 Ton	15.701
			0.51 - (63°)		22.10 m ²	17.51 m ²	15.58 m ²	114.09 Ton	20.536 Ton	7.929
			0.51 - (63°)	10.28 m	206.71 m ²	55.70 m ²	-----	383.72 Ton	69.069 Ton	20.306
			-----	7.76 m	22.42 m ²	29.67 m ²	3.24 m ²	95.47 Ton	17.185 Ton	10.519
General 5 Dir Echado 330°	EST (46/234) - S3 (76/8).	LV (65/295)/2mts	1:1 - (45°)		95.55 m ²	58.39 m ²	18.97 m ²	443.58 Ton	79.844 Ton	13.218
			0.51 - (63°)	10.28 m	93.97 m ²	45.81 m ²	31.42 m ²	565.32 Ton	101.757 Ton	11.118
			0.51 - (63°)	9.14 m	22.41 m ²	9.82 m ²	4.52 m ²	45.29 Ton	8.152 Ton	5.9107
			-----	7.76 m	7.21 m ²	8.63 m ²	-----	6.86 Ton	1.234 Ton	39.773
			1:1 - (45°)		14.80 m ²	14.23 m ²	1.65 m ²	28.67 Ton	5.161 Ton	19.164
General 6 Dir Echado 315°	EST (46/234) - S3 (76/8).	LV (65/295)/1mts	1:1 - (45°)		24.18 m ²	25.56 m ²	8.46 m ²	119.48 Ton	21.507 Ton	8.763
			0.51 - (63°)	7.76 m	108.00 m ²	55.49 m ²	7.99 m ²	320.89 Ton	57.759 Ton	16.636
			0.51 - (45°)	10.28 m	139.92 m ²	55.91 m ²	20.50 m ²	661.66 Ton	119.098 Ton	12.142
			0.51 - (63°)	9.14 m	27.24 m ²	9.42 m ²	-----	33.93 Ton	6.108 Ton	8.421
			-----	7.76 m	15.79 m ²	4.97 m ²	25.69 m ²	66.93 Ton	12.048 Ton	8.13284
General 7 Dir Echado 285°	EST (46/234) - S3 (76/8).	LV (65/295)/2mts	1:1 - (45°)		23.69 m ²	12.90 m ²	5.21 m ²	53.14 Ton	9.565 Ton	14.3884
			0.51 - (63°)		33.03 m ²	23.95 m ²	44.51 m ²	243.59 Ton	43.847 Ton	10.837
General 8 Dir Echado 359°	LV (65/295) - S1 (66/56).	S3 (76/8)/2mts	1:1 - (45°)		53.73 m ²	46.28 m ²	31.80 m ²	335.97 Ton	60.475 Ton	12.179
			0.51 - (63°)	10.28 m	9.14 m	17.27 m ²	4.24 m ²	55.87 Ton	10.056 Ton	5.304
			0.51 - (63°)		9.14 m	17.52 m ²	4.24 m ²	55.87 Ton	10.056 Ton	4.329

Tabla 4.16 Resumen de los factores de seguridad de taludes.

A partir de un primer análisis de las condiciones de equilibrio límite de las fallas en cuña que se encontraron en el nuevo talud propuesto debido al movimiento de la cortina analizados, al igual que en el anterior talud se considera que los bloques se mantienen estables con factores de seguridad muy encima de los requeridos, cuando solo se lo considera el caso estático, es decir cuando no entran en el análisis las fuerzas sísmicas e hidrostáticas.

Se observó que las cuñas que presentaron las condiciones de estabilidad por debajo del factor de seguridad requerido fueron debido a la perdida de contacto del bloque con los planos de deslizamiento, debido a que la fuerza hidrostática era mayor a la ejercida por el peso propio de la cuña sobre los planos. Estos casos serán analizados a continuación para poder ver el tratamiento y la fuerza de anclaje mínima que necesitara para llegar a estabilizar el mismo.

La tabla 4.17 contiene los resultados que forman las cuñas más desfavorables, es de estos análisis que se diseñara el sistema de soporte, que más adelante se describe para así poder estabilizar los bloques que podrían deslizar, el cálculo de las cuñas se lo hizo aplicando fuerzas externas contrarias a la resultante de las fuerzas actuantes.

Tabla resumen de factores de seguridad para diseño del nuevo talud													
Talud	Planos que forman el Talud P1-P2	Grieta de tensión / Distancia	Echado de la cara del Talud	Altura	Área Plano 1 (m ²)	Área Plano 2 (m ²)	Área de la Grieta (m ²)	Peso (Ton)	Fuerza Externa (W*0.18)	FS- Estático	FS- Estático + Agua	FS - Estático - Sismo	FS- Estático + Agua + Sismo
General 5 Dir Echado 330°	EST (46/234) - S3 (76/8).	-----	1:1 - (45°)	7.76 m	7.21 m ²	8.63 m ²	-----	6.86 Ton	1.234 Ton	39.773	0.000	29.675	0.000
General 7 Dir Echado 285°	EST (46/234) - S3 (76/8)	LV (65/295)/2mts	0.5:1 - (63°)	7.76 m	15.79 m ²	4.97 m ²	25.69 m ²	66.93 Ton	12.048 Ton	8.13284	0	6.0439	0

Tabla 4.17 Taludes con factores de seguridad menores a los requeridos.

4.7 Análisis del diseño de soporte para taludes con fallas.

Como se puede apreciar en la tabla 4.17 al igual que en casos anteriores el factor de seguridad de los taludes tienen un factor de seguridad igual a 0 cuando actúa la presión de agua sobre las discontinuidades, esto quiere decir que las fuerzas normales al plano de discontinuidad producidas por la presión de agua son mayores a las fuerzas normales que ejerce el peso del talud. Dando como resultado normales negativas. Este fenómeno produce la no existencia de la fuerza resistente al perderse el contacto entre el talud y los planos de deslizamiento, debido a que entre ambas caras habrá una película de agua la cual no tiene resistencia al corte.

Por lo que para el cálculo de la fuerza necesaria para aguantar esa presión de agua, se la hará de manera matemática, contrarrestando así la fuerza que ejerce el agua sobre los planos de deslizamiento, de esta manera lograremos que el talud se comporte solo estáticamente, el cálculo de la fuerza se lo describe a continuación, con datos extraídos del programa, u_1 (Presión de agua), W_i (Peso del bloque sobre los planos)

4.7.1 Talud General 5 1:1 – Planos de fallas EST-S3

DATOS	
N1:	-3.4419 T
N2:	-7.6402 T
u1:	7.2058 T/m ²
Área 1:	8.6294 m ²
Área 2 :	11.1607 m ²
W:	6.8555 T
U1	9.3194 T
U2	11.1607 T
W1	5.8776 T
W2	3.5205T

Donde U_1 y U_2 son las fuerzas normales que ejerce el agua, y W_1 y W_2 son las fuerzas normales producidas por el peso del bloque sobre los planos de deslizamiento.

Debido a que buscaremos la fuerza necesaria para contrarrestar la fuerza del agua, del programa se obtendrá los vectores unitarios Normales a los planos de discontinuidad:

- Vector unitario normal al plano 1
 $I_x, I_y, I_z = -0.0493x, 0.8269y, 0.4620z$
- Vector unitario normal al plano 2
 $k_x, k_y, k_z = -0.5392x, -0.1184y, 0.7713z$
- Calculo del vector equipolente de la presión de agua sobre los planos de discontinuidad.

$$U_1 = -0.4597x, 7.7063y, 4.3055z$$

$$U_2 = -6.0179, -1.3214y, 8.6083z$$

- Resultante de la sumatoria de las presiones de agua

$$U = 6.4776x, -6.3849y, -12.9137z$$

$$|U| = 15.795 \text{ Ton}$$

- Dirección de echado y echado de la fuerza que se aplicara

$$\psi = \arcsin(-Uz) = \arcsin\left(-\frac{-12.9138}{15.795}\right) = 54.844^\circ$$

$$\alpha = \tan\left(\frac{U_x}{U_y}\right) = \tan\left(\frac{6.4776/15.795}{-6.3849/15.795}\right) + 180 = 134.58^\circ$$

4.7.2 Talud General 7 0.5:1 – Planos de fallas EST-S3

DATOS	
N1:	-27.09 T
N2	-13.704 T
u1:	2.3171 T/m ²
Área 1:	15.7934 m ²
Área 2 :	4.9689 m ²
W:	66.9335 T
U1	36.5957 T
U2	11.5136 T
W1	57.3850 T
W2	34.3722 T
V	59.5369 T

Donde U1 y U2 son las fuerzas normales que ejerce el agua, W1 y W2 son las fuerzas normales producidas por el peso del bloque sobre los planos de deslizamiento y V es la presión de agua ejercida sobre la grieta de tensión.

Debido a que buscaremos la fuerza necesaria para contrarrestar la fuerza del agua, del programa se obtendrá los vectores unitarios Normales a los planos de discontinuidad:

- Vector unitario normal al plano 1
 $I_x, I_y, I_z = -0.0493 x, 0.8269 y, 0.4620 z$
- Vector unitario normal al plano 2
 $k_x, k_y, k_z = -0.5392 x, -0.1184 y, 0.7713 z$

- Calculo del vector equipolente de la presión de agua sobre los planos de discontinuidad.

$$U_1 = -1.8051x, 30.2612y, 16.9068z$$

$$U_2 = -6.2079x, -1.3634y, 8.8804z$$

- Resultante de la sumatoria de las presiones de agua
 $U = 8.0130x, -28.8977y, -25.7873z$
- Fuerza de anclaje necesaria para el empuje sobre la grieta de Tensión.
 $V = 48.9032x, -22.8040y, -25.1614z$
- Resultante de la fuerza de anclaje.

$$F_A = 56.9162x, -51.7017y, -50.9486z$$

$$|F_A| = 92.2403 \text{ Ton (Fuerza de anclaje necesaria)}$$

- Dirección de echado y echado de la fuerza que se aplicara

$$\psi = \arcsin(-U_z) = \arcsin\left(-\frac{-50.9486}{92.2403}\right) = 33.5281^\circ$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{U_x}{U_y}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{56.9162/92.2403}{-51.7017/92.2403}\right) + 180 = 132.2514^\circ$$

4.8 Diseño de tratamientos de soporte talud de diseño 2

Al igual que en los cálculos anteriores el diseño de soporte se basara en de fricción, el diámetro de las anclas será de Ø16, Ø20 y Ø25.

Calculo de la tensión del ancla

$$T_a \ Ø16 = 6.0 \text{ Ton}$$

$$T_a \ Ø20 = 9.8 \text{ Ton}$$

$$T_a \ Ø25 = 15.9 \text{ Ton}$$

Caso 4 - Talud General 5 1:1 – Planos de fallas EST-S3

Se necesita una fuerza de anclaje de 18.144 Ton, el área de la cara del talud es de 8.565 m² (Swedge)

$$esf. actuante = \frac{F \text{ anclaje}}{\text{Área cuña}} = \frac{15.795 \text{ ton}}{8.565 \text{ m}^2} = 1.844 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$$

$$A = \frac{Ta \varnothing 25}{\sigma} = \frac{15.9 \text{ ton}}{1.8173 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}} = 8.74 \text{ m}^2 \quad \rightarrow \text{Área que soporta la barra de anclaje}$$

La longitud del ancla será proporcional a la altura de la cuña analizada 7.76 mts = 8 mts

En el caso 4 se colocaran anclajes de diámetro Ø25 (25mm) cada 3.0 mts, para poder así cubrir un área de 9.0 m²

Caso 5 - Talud General 7 0.5:1 – Planos de fallas EST-S3

Se necesita una fuerza de anclaje de 92.2403 Ton, el área de la cara del talud es de 34.4219 m² (Swedge)

$$esf. actuante = \frac{F \text{ anclaje}}{\text{Área cuña}} = \frac{92.2403 \text{ ton}}{34.4219 \text{ m}^2} = 2.6796 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$$

$$A = \frac{Ta \varnothing 25}{\sigma} = \frac{15.9 \text{ Ton}}{2.6796 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}} = 5.9335 \text{ m}^2 \quad \rightarrow \text{Área que soporta la barra de anclaje}$$

La longitud del ancla será proporcional a la altura de la cuña analizada 7.76 mts = 8mts

En el caso 5 se colocaran anclajes de diámetro Ø25 (25mm) cada 2.5 mts, para poder así cubrir un área de 6.25 m².

4.9 Sistemas de soporte

En el diseño del sistema de anclaje, se utilizó una fuerza por unidad de longitud, equivalente al 75% de la capacidad total del ancla.

Atendiendo a las acciones que gravitarán sobre el sistema de soporte, éste podrá ser resuelto mediante la fijación de anclas de fricción (Fuerzas de anclaje calculadas anteriormente), que eventualmente trabajará en conjunto con un revestimiento de concreto lanzado reforzado con malla electro soldada y concreto hidráulico en las zonas de menor calidad de roca.

Los elementos de soporte y drenaje que se recomiendan más adelante deben cumplir con las siguientes características:

Anclaje. Se emplearán anclas de fricción con barras de varilla corrugada de Ø16, Ø20 y Ø25, con longitudes de 10 m, según se indique en las tablas siguientes, el límite de fluencia del acero de las anclas deberá ser de 411.9 MPa (4200 kg/cm²) y serán colocadas en barrenos de 20 mm, 25mm y 57mm de diámetro respectivamente. Se inyectarán con mortero de $f'c \geq 17.65$ MPa (180 kg/cm²). La colocación será en tresbolillo, con separación variable según se indica en las tablas. El extremo de cada ancla deberá tener una longitud roscada de 20 cm para sujetar una placa metálica apoyada contra el terreno por medio de una tuerca. La placa debe ser de 20 x 20 cm, de 12 mm (1/2") de espesor.

Concreto lanzado. Será de $f'c \geq 19,6$ MPa (200 kg/cm²), de 8 cm espesor, con mallas electro soldadas de acero. Esto con el objetivo de disipar las presiones hidrostáticas en toda el área de colocación de concreto lanzado, se perforaran drenes de 38.1 mm (1½") de diámetro mínimo penetrando 0,20 m, esto para evitar la acumulación de agua en el interior del macizo rocoso.

Para el tratamiento de las fallas se deberá retirar el material de mala calidad como mínimo en el ancho de la falla y profundidad definida, se hará limpieza y reposición con concreto $f'c=19.6$ MPa (200kg/cm²) se deberá considerar la colocación de tubos guía de PVC para la inyección de lechada de concreto posterior.

4.10 Resumen de tablas por elevaciones

4.10.1 Talud de diseño 1

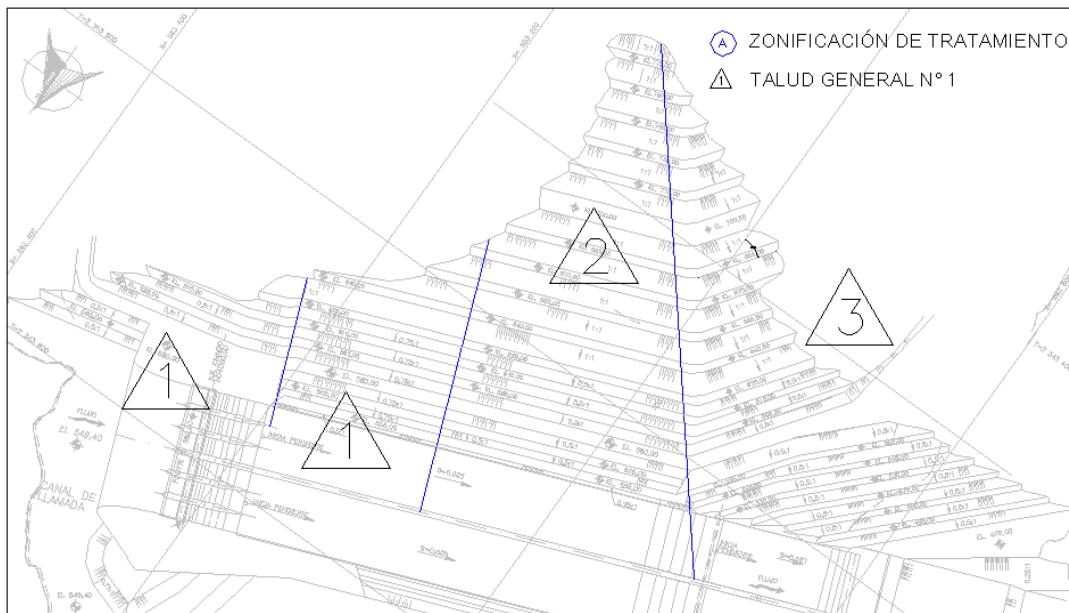


Figura 4.1. Zonificación del talud de diseño

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE.

Resumen de análisis de estabilidad Talud General 3				
Talud del margen izquierdo Presa la Yesca				
Elevacion	Inclinacion del talud	Litologia	Anclaje de Fricción y tratamiento de fallas	Concreto lanzado f'c=19,6 Mpa, y malla metálica de 15x15 cm y 1/8"
470,00 - 625,00	0.50:1	Tmird (Tmird) fuertemente silicificada	Anclajes con diametro Ø16, con direcciones de echado 140° y echado de 14° en toda el área de talud, patrón 4.0 x 4.0 m, de forma ascendente a partir de 1,5 m, longitud del ancla sera de 10mts	Area expuesta a posible erosión debido al agua proveniente del canal de descarga, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
625,00 - 685,00	1:1	Tmird (Tmird) fuertemente silicificada	Sin anclaje, se deberá hacer un trramiento a las fallas debido a que es por esta zona que atraviesa la Falla Vertedor 1	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
685,00 - 775,00	1:1	Tda, Tmbr, Qdt, Tmts	Sin anclaje, debido a que con las propiedades del talud se obtienen factores de seguridad mayores a 1.5	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla

Resumen de análisis de estabilidad Talud General 2				
Talud del margen izquierdo Presa la Yesca				
Elevacion	Inclinacion del talud	Litologia	Anclaje de Fricción y tratamiento de fallas	Concreto lanzado f'c=19,6 Mpa, y malla metálica de 15x15 cm y 1/8" de espesor
550,00 - 625,00	0.50:1	Tmird (Tmird) fuertemente silicificada, Tda	Sin anclaje, debido a que con las propiedades del talud se obtienen factores de seguridad mayores a 1.5, se deberá hacer un trramiento a las fallas debido a que es por esta zona que atraviesa la Falla Colorado	Area expuesta a posible erosión debido al agua proveniente del canal de descarga, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
625,00 - 775,00	1:1	Qlp, Tmbr, Tmts	Sin anclaje, se deberá hacer un trramiento a las fallas debido a que es por esta zona que atraviesa la Falla Vertedor 1	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla

Resumen de análisis de estabilidad Talud General 1				
Talud del margen izquierdo Presa la Yesca				
Elevacion	Inclinacion del talud	Litologia	Anclaje de Fricción y tratamiento de fallas	Concreto lanzado f'c=19,6 Mpa, y malla metálica de 15x15 cm y 1/8" de espesor
580,00 - 625,00 Izquierda	01:01	Qlp	Sin anclaje, debido a que con las propiedades del talud se obtienen factores de seguridad mayores a 1.5.	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
550,00 - 625,00 derecha	0.75:1	Tmird fuertemente silicificada, Qdt	Anclajes con diametro Ø25, con direcciones de echado 187° y echado de 42° en toda el área de talud, patrón 3.0 x 3.0 m, de forma ascendente a partir de 1,5 m, longitud del ancla sera de 9mts	Area expuesta a posible erosión debido al agua proveniente del canal de descarga, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
625,00 - 630,00 Derecha	1:1	Qdt	Sin anclaje, debido a que con las propiedades del talud se obtienen factores de seguridad mayores a 1.5.	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla

Tabla 4.18 Resumen de análisis de estabilidad en taludes de diseño 1

4.10.2 Talud de diseño 2

Dentro del macizo rocoso como se mencionó anteriormente se tienen distintos tipos de litologías, entre las estructuras geológicas que se forman, tenemos las discontinuidades y las condiciones de meteorización y alteración de la masa.

La excavación del talud de diseño en el margen izquierdo de la central hidroeléctrica la Yesca, se encuentra alojada sobre varias familias geológicas, entre las que tenemos (Fig. 4.14):

Qdt.- Depósito de talud.

Tmbr.- Ignimbrita riolítica brechoide.

Tmts.- Toba vítreas desvitrificadas.

Qlp.- Toba pumítica y depósitos pumíticos lacustres.

Tmid.- Ignimbrita intrusionada por diques riolíticos, andecíticos, y diabásicos.

Tmird.- Dacita Fluidal.

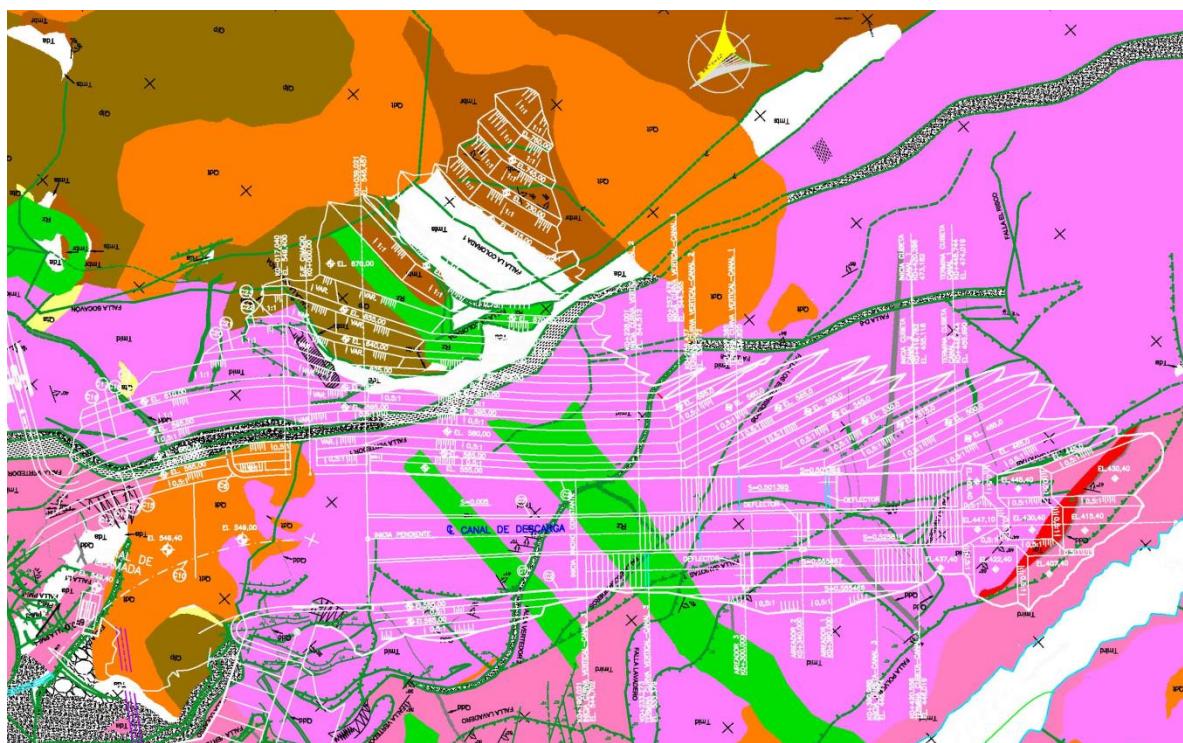
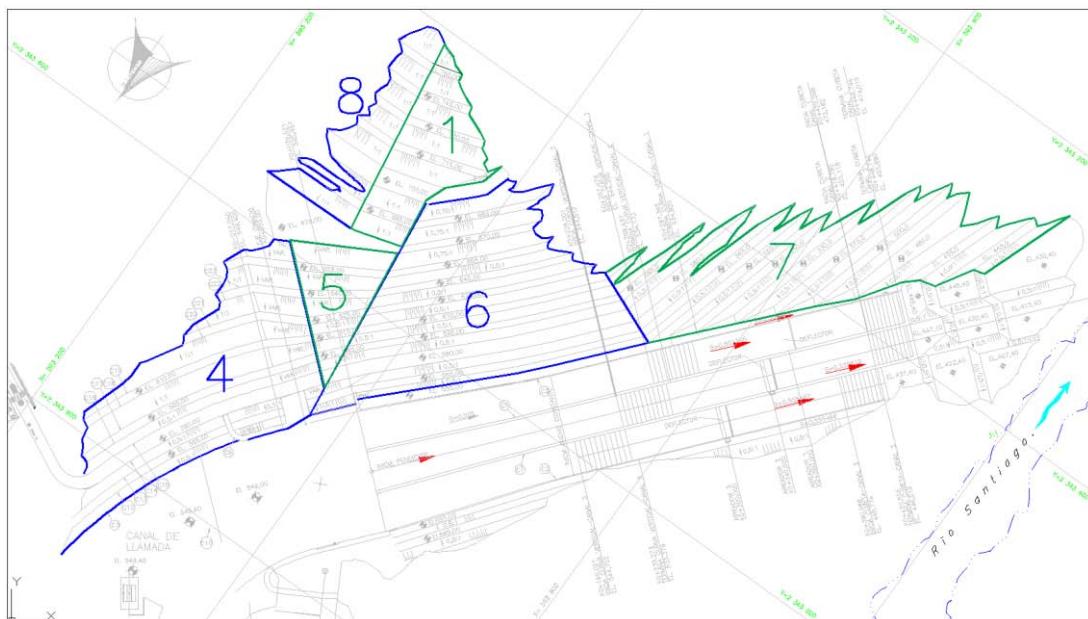


Fig. 4.14 Talud de diseño 2 junto a la geología del sitio

Con los resultados obtenidos de las fallas en cuña que podrían llegar a afectar el nuevo de talud de diseño, a continuación se mostrarán los resúmenes de las condiciones de estabilidad necesarias para el talud.

**Fig. 4.8.** Nueva Zonificación del talud de diseño

Fuente.- Informe 06/081/SGM/R - CFE.

Resumen de análisis de estabilidad Talud General 4 Talud del margen izquierdo Presa la Yesca				
Elevación	Inclinación del talud	Litología	Anclaje de Fricción y tratamiento de fallas	Concreto lanzado $f'c=19,6$ Mpa, y malla metálica de 15x15 cm y 1/8"
549,00- 594,00	0.50:1	Qdt y Tmid fuertemente silicificada	Sin anclaje, se deberá hacer un tratamiento a las fallas debido que la Falla Vertedor 1, atraviesa paralela a la misma.	Área expuesta a posible erosión debido al agua proveniente del canal de descarga, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
595,00- 670,00	1:1	Tmid	Sin anclaje, se deberá hacer un tratamiento a las fallas debido a que es por esta zona que atraviesa la Falla Vertedor 1	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
Resumen de análisis de estabilidad Talud General 5 Talud del margen izquierdo Presa la Yesca				
Elevación	Inclinación del talud	Litología	Anclaje de Fricción y tratamiento de fallas	Concreto lanzado $f'c=19,6$ Mpa, y malla metálica de 15x15 cm y 1/8" de espesor
580,00 - 640,00	0.50:1	Qlp	Anclajes con diámetro Ø25, con direcciones de echado 135° y echado de 56° en toda el área de talud, patrón 3.0 x 3.0 m, de forma ascendente a partir de 1,5 m, longitud del ancla será de 8mts	Área expuesta a posible erosión debido al agua proveniente del canal de descarga, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
640,00 - 670,00	1:1	Toda, Tmid	Sin anclaje, se deberá hacer un tratamiento a las fallas debido a que es por esta zona que atraviesa la Falla Vertedor 1	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla

Resumen de análisis de estabilidad Talud General 6 Talud del margen izquierdo Presa la Yesca				
Elevación	Inclinación del talud	Litología	Anclaje de Fricción y tratamiento de fallas	Concreto lanzado $f'c=19,6$ Mpa, y malla metálica de 15x15 cm y 1/8" de espesor
580,00 - 625,00 Izquierda	0.50:1	Tmid fuertemente silicificada, en la parte inferior, y Qlp, Tmts, en la parte superior.	Sin anclaje, debido a que con las propiedades del talud se obtienen factores de seguridad mayores a 1.5.	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
Resumen de análisis de estabilidad Talud General 7 Talud del margen izquierdo Presa la Yesca				
Elevación	Inclinación del talud	Litología	Anclaje de Fricción y tratamiento de fallas	Concreto lanzado $f'c=19,6$ Mpa, y malla metálica de 15x15 cm y 1/8" de espesor
565,00 - 595,00	0.50:1	Tmid fuertemente silicificada	Sin anclaje, debido a que con las propiedades del talud se obtienen factores de seguridad mayores a 1.5.	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
Resumen de análisis de estabilidad Talud General 8 Talud del margen izquierdo Presa la Yesca				
Elevación	Inclinación del talud	Litología	Anclaje de Fricción y tratamiento de fallas	Concreto lanzado $f'c=19,6$ Mpa, y malla metálica de 15x15 cm y 1/8" de espesor
670,00 - 750,00	1:1	Tmts, Tmbr	Sin anclaje, debido a que con las propiedades del talud se obtienen factores de seguridad mayores a 1.5.	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla
Resumen de análisis de estabilidad Talud General 1 Talud del margen izquierdo Presa la Yesca				
Elevación	Inclinación del talud	Litología	Anclaje de Fricción y tratamiento de fallas	Concreto lanzado $f'c=19,6$ Mpa, y malla metálica de 15x15 cm y 1/8" de espesor
670,00 - 750,00	1:1	Tmts, Tmbr	Sin anclaje, debido a que con las propiedades del talud se obtienen factores de seguridad mayores a 1.5.	100% del área expuesta, 8 cm de espesor y un lienzo de malla

Tabla 4.19 Resumen de análisis de estabilidad en taludes diseño 2



CONCLUSIONES

Conclusiones

En este proyecto se generó un programa de cómputo para el análisis de taludes en cuña en un macizo rocoso, basándose en el equilibrio límite en tres dimensiones propuesto por Hoek y Bray, El programa se validó con varios casos de taludes, comparando resultados con los que nos daba el programa SWEDGE.

El programa realizado, es capaz de calcular las áreas de los planos de fallas, como su peso, y el factor de seguridad con el que el talud analizado cuenta, de igual manera es capaz de calcular la fuerza de anclaje necesaria para que el talud llegue a ser estable.

Con esta herramienta se logrará agilizar el proceso de análisis de estabilidad de taludes rocosos y su diseño, con lo que se obtendrá un estudio más profundo y resultados más confiables. Debido a que los resultados obtenidos en el programa serán más precisos que los encontrados por realización manual mediante estereografía, ya que este se aplica automáticamente mediante ecuaciones generadas con base en las relaciones geométricas del talud.

No cabe mencionar que la validez de los resultados dependerá de la fidelidad de los datos de entrada, es decir las características físicas del macizo como las propiedades de las discontinuidades (ϕ y C).

El caso en el que se aplicó el programa realizado fue en el talud izquierdo del proyecto hidroeléctrico la Yesca. Este se asentará sobre depósitos de talud (Qdt), como en dacitas porfídicas (Tmid) y riodacítas fluidales con diferentes calidades estructurales, las cuales están parcialmente cubiertas por materiales poco compactos de mala calidad, tales como la toba superior (Tmts), ignimbrita riolítica brechoide (Tmbr), depósitos de talud (Qdt), depósitos de terrazas aluviales (Qta) y depósitos lacustres y pumicíticos (Qlp).

A lo largo del macizo rocoso se presentan discontinuidades geológicas, entre las más importantes tenemos las fallas Vertedor 1 y 2, Mogote y Socavón. Se considera a la falla Vertedor 1, como la estructura más importante de esta margen izquierda, debido a su continuidad, espesor, características geométricas y su posición quasiparalela al canal vertedor, las fallas estructurales tendrán gran influencia por la estratificación presente en el sitio, conjuntamente con los cuatro sistemas de fracturamiento encontrados en la zona (S1 N34°W/66°NE, S2 N45°E/57°SE asociado a las fallas Vertedor 1 y 2; S3 N82°W/76°NE; S4 N10°E/59°SE)

De acuerdo a los resultados de los estudios de la roca intacta, estimaciones de parámetros, se realizó la correspondiente clasificación geomecánica media del macizo rocoso aplicando el criterio de Bieniawski de 1989 en la determinación del RMR (Rock Mass Rating), observándose en su mayoría calidades de roca de muy mala a mala y solamente en la roca

que se adentra en la masa rocosa y se aleja de las estructuras geológicas dominantes la condición mejora con una calificación máxima de buena calidad.

Para definir los criterios de diseño, primeramente se analizó la información del informe 06/081/SGM/R – CFE, mostrada en este trabajo en el capítulo 3, y es a partir de ella que se identificaron los posibles mecanismos de falla que pudieran activarse y que pudieran afectar la estabilidad del talud.

Debido al cambio de posición de la cortina de la C.H. la Yesca por diversos motivos, el talud de diseño o el talud izquierdo aguas abajo de la presa se tuvo que rediseñar al moverse esta 14° hacia el suroeste, identificándose los posibles mecanismos de falla que pudieran darse y de esta manera podrían afectar la estabilidad del talud en general. El talud nuevo, tiene cuatro distintas direcciones de echado, las cuales se rigieron por la topografía de la zona. El análisis de estabilidad de las mismas se lo hizo de manera más rápida, debido a que ya se tenían estudiados y definidos las propiedades y características geomecánicas de las discontinuidades, proceso que acelero el análisis. En este caso se puede concluir que los cambios que se puedan presentar en obra, no necesitaran de grandes tiempos de estudio debido al estudio preliminar realizado en la etapa de la ejecución del proyecto ejecutivo. Pudiendo así enfrentar cualquier cambio que se pueda generar durante la etapa de ejecución de la obra.

En ambos análisis tanto en el del primer talud propuesto, como el del cambio generado a último momento se pudo apreciar que los factores de seguridad era iguales a 0, en los casos donde actúa la presión de agua sobre las discontinuidades, esto quiere decir que las fuerzas normales al plano de discontinuidad producidas por la presión de agua son mayores a las fuerzas normales que ejerce el peso del talud. Dando como resultado normales negativas. Este fenómeno produce la no existencia de la fuerza resistente al perderse el contacto entre el talud y los planos de deslizamiento, debido a que entre ambas caras habrá una película de agua la cual no tiene resistencia al corte.

La solución a los problema de estabilidad a casos encontrados con factores de seguridad más bajos de los requeridos, a los cuales se les aplico de tratamientos de estabilidad convencionales, anclaje, concreto lanzado, drenaje y particulares en taludes de gran altura como es el diseño de la geometría misma de los taludes.

En el diseño del sistema de anclaje, se utilizó una fuerza por unidad de longitud, equivalente al 75% de la capacidad total del ancla.



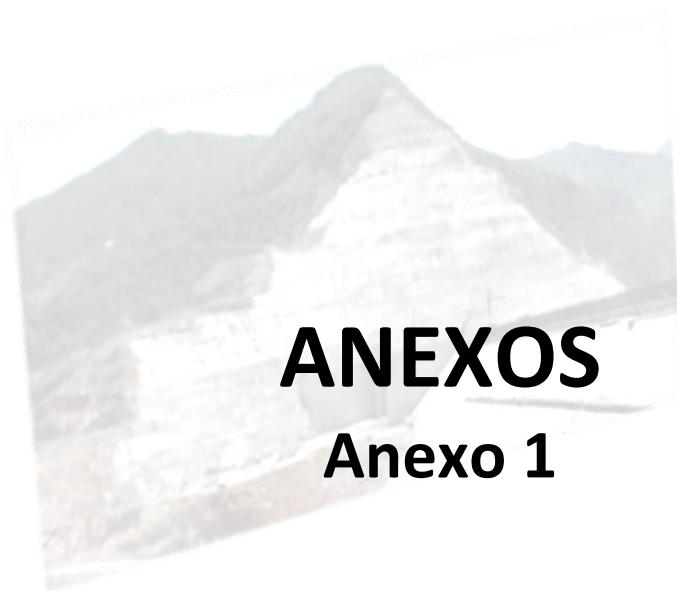
BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- Ingeniería Geológica – Gonzales de Vallejo.
- Rock Slope Engineering – Evert Hoek and John Bray 3era y 4ta edition
- Resistencia al corte en discontinuidades con diferentes Grados de rugosidad - Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 19-1, pp. 55-70.
- Mecánica de rocas – Fundamentos de ingeniería de taludes – Pedro Ramírez Oyanguero
- Manual de geología para ingenieros – Gonzalo Duque Escobar
- Informe 06/081/SGM/R - CFE.



ANEXOS



ANEXOS

Anexo 1

III.5 Notation

The wedge geometry is illustrated in Figure III.1; the following input data are required:

- ψ, α = dip and dip direction of plane, or plunge and trend of force
- H_1 = slope height referred to plane 1
- L = distance of tension crack from crest, measured along the trace of plane 1
- u = average water pressure on planes 1 and 2
- c = cohesion of each slide plane
- ϕ = angle of friction of each slide plane
- γ = unit weight of rock
- γ_w = unit weight of water
- T = anchor tension
- E = external load
- η = -1 if face is overhanging, and +1 if face does not overhang

Other terms used in the solution are as follows:

- FS = factor of safety against sliding along the line of intersection, or on plane 1 or plane 2
- A = area of sliding plane or tension crack
- W = weight of wedge
- V = water thrust on tension crack (plane 5)

- | | |
|---------------------------------------|--|
| N_a = total normal force of plane 1 | when contact is maintained on plane 1 only |
| S_a = shear force on plane 1 | |
| Q_a = shear resistance on plane 1 | |
| FS_1 = factor of safety | |

- | | |
|---------------------------------------|--|
| N_b = total normal force on plane 2 | when contact is maintained on plane 2 only |
| S_b = shear force on plane 2 | |
| Q_b = shear resistance on plane 2 | |
| FS_2 = factor of safety | |

- | | |
|--|---|
| N_1, N_2 = effective normal reactions | when contact is maintained on both planes 1 and 2 |
| S = total shear force on planes 1 and 2 | |
| Q = total shear resistance on planes 1 and 2 | |
| FS_3 = factor of safety | |

N'_1, N'_2, S' , etc. = values of N_1, N_2, S etc. when $T = 0$

N''_1, N''_2, S'' , etc. = values of N_1, N_2, S etc. when $E = 0$

\vec{a} = unit normal vector for plane 1

\vec{b} = unit normal vector for plane 2

\vec{d} = unit normal vector for plane 3

\vec{f} = unit normal vector for plane 4

\vec{f}_5 = unit normal vector for plane 5

\vec{g} = vector in the direction of intersection line of 1, 4

\vec{g}_5 = vector in the direction of intersection line of 1, 5

\vec{i} = vector in the direction of intersection line of 1, 2

\vec{j} = vector in the direction of intersection line of 3, 4

\vec{j}_5 = vector in the direction of intersection line of 3, 5

\vec{k} = vector in plane 2 normal to \vec{i}

\vec{l} = vector in plane 1 normal to \vec{i}

R = magnitude of vector \vec{i}

G = square of magnitude of vector \vec{g}

G_5 = square of magnitude of vector \vec{g}_5

Note: The computed value of V is negative when the tension crack dips away from the toe of the slope, but this does not indicate a tensile force.

III.6 Sequence of calculations

- 1 Calculation of factor of safety when the forces T and E are either zero or completely specified in magnitude and direction.

- (a) Components of unit vectors in directions of normals to planes 1–5, and of forces T and E .

- (a_x, a_y, a_z)
 $= (\sin \psi_1 \sin \alpha_1, \sin \psi_1 \cos \alpha_1, \cos \psi_1)$ (III.1)
- (b_x, b_y, b_z)
 $= (\sin \psi_2 \sin \alpha_2, \sin \psi_2 \cos \alpha_2, \cos \psi_2)$ (III.2)
- (d_x, d_y, d_z)
 $= (\sin \psi_3 \sin \alpha_3, \sin \psi_3 \cos \alpha_3, \cos \psi_3)$ (III.3)
- (f_x, f_y, f_z)
 $= (\sin \psi_4 \sin \alpha_4, \sin \psi_4 \cos \alpha_4, \cos \psi_4)$ (III.4)
- (f_{5x}, f_{5y}, f_{5z})
 $= (\sin \psi_5 \sin \alpha_5, \sin \psi_5 \cos \alpha_5, \cos \psi_5)$ (III.5)
- (t_x, t_y, t_z)
 $= (\cos \psi_t \sin \alpha_t, \cos \psi_t \cos \alpha_t, -\sin \psi_t)$ (III.6)
- (e_x, e_y, e_z)
 $= (\cos \psi_e \sin \alpha_e, \cos \psi_e \cos \alpha_e, -\sin \psi_e)$ (III.7)
- (b) Components of vectors in the direction of the lines of intersection of various planes.
- (g_x, g_y, g_z)
 $= (f_y a_z - f_z a_y, (f_z a_x - f_x a_z), (f_x a_y - f_y a_x))$ (III.8)
- (g_{5x}, g_{5y}, g_{5z})
 $= (f_{5y} a_z - f_{5z} a_y, (f_{5z} a_x - f_{5x} a_z), (f_{5x} a_y - f_{5y} a_x))$ (III.9)
- (i_x, i_y, i_z)
 $= (b_y a_z - b_z a_y, (b_z a_x - b_x a_z), (b_x a_y - b_y a_x))$ (III.10)
- (j_x, j_y, j_z)
 $= (f_y d_z - f_z d_y, (f_z d_x - f_x d_z), (f_x d_y - f_y d_x))$ (III.11)
- (j_{5x}, j_{5y}, j_{5z})
 $= (f_{5y} d_z - f_{5z} d_y, (f_{5z} d_x - f_{5x} d_z), (f_{5x} d_y - f_{5y} d_x))$ (III.12)
- (k_x, k_y, k_z)
 $= (i_y b_z - i_z b_y, (i_z b_x - i_x b_z), (i_x b_y - i_y b_x))$ (III.13)
- (l_x, l_y, l_z)
 $= (a_y i_z - a_z i_y, (a_z i_x - a_x i_z), (a_x i_y - a_y i_x))$ (III.14)
- (c) Numbers proportional to cosines of various angles.
- $m = g_x d_x + g_y d_y + g_z d_z$ (III.15)
- $m_5 = g_{5x} d_x + g_{5y} d_y + g_{5z} d_z$ (III.16)
- $n = b_x j_x + b_y j_y + b_z j_z$ (III.17)
- $n_5 = b_x j_{5x} + b_y j_{5y} + b_z j_{5z}$ (III.18)
- $p = i_x d_x + i_y d_y + i_z d_z$ (III.19)
- $q = b_x g_x + b_y g_y + b_z g_z$ (III.20)
- $g_5 = b_x g_{5x} + b_y g_{5y} + b_z g_{5z}$ (III.21)
- $r = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$ (III.22)
- $s = a_x t_x + a_y t_y + a_z t_z$ (III.23)
- $v = b_x t_x + b_y t_y + b_z t_z$ (III.24)
- $w = i_x t_x + i_y t_y + i_z t_z$ (III.25)
- $s_e = a_x e_x + a_y e_y + a_z e_z$ (III.26)
- $v_e = b_x e_x + b_y e_y + b_z e_z$ (III.27)
- $w_e = i_x e_x + i_y e_y + i_z e_z$ (III.28)
- $s_5 = a_x f_{5x} + a_y f_{5y} + a_z f_{5z}$ (III.29)
- $v_5 = b_x f_{5x} + b_y f_{5y} + b_z f_{5z}$ (III.30)
- $w_5 = i_x f_{5x} + i_y f_{5y} + i_z f_{5z}$ (III.31)
- $\lambda = i_x g_x + i_y g_y + i_z g_z$ (III.32)
- $\lambda_5 = i_x g_{5x} + i_y g_{5y} + i_z g_{5z}$ (III.33)
- $\varepsilon = f_x f_{5x} + f_y f_{5y} + f_z f_{5z}$ (III.34)

402 Appendix III

(d) Miscellaneous factors.

$$R = \sqrt{1 - r^2} \quad (\text{III.35})$$

$$= \frac{1}{R^2} \cdot \frac{nq}{|nq|} \quad (\text{III.36})$$

$$\mu = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{mq}{|mq|} \quad (\text{III.37})$$

$$\nu = \frac{1}{R} \cdot \frac{p}{|p|} \quad (\text{III.38})$$

$$G = g_x^2 + g_y^2 + g_z^2 \quad (\text{III.39})$$

$$G_5 = g_{5x}^2 + g_{5y}^2 + g_{5z}^2 \quad (\text{III.40})$$

$$M = (Gp^2 - 2mp\lambda + m^2 R^2)^{1/2} \quad (\text{III.41})$$

$$M_5 = (G_5 p^2 - 2m_5 p \lambda_5 + m_5^2 R^2)^{1/2} \quad (\text{III.42})$$

$$h = \frac{H_1}{|g_z|} \quad (\text{III.43})$$

$$h_5 = \frac{Mh - |p|L}{M_5} \quad (\text{III.44})$$

$$B = [\tan^2 \phi_1 + \tan^2 \phi_2 - 2(\mu r/\rho) \times \tan \phi_1 \tan \phi_2]/R^2 \quad (\text{III.45})$$

(e) Plunge and trend of line respectively of line of intersection of planes 1 and 2:

$$\psi_I = \arcsin(vi_z) \quad (\text{III.46})$$

$$\alpha_I = \arctan\left(\frac{-vi_x}{-vi_y}\right) \quad (\text{III.47})$$

The term $-v$ should not be cancelled out in equation (III.47) since this is required to determine the correct quadrant when calculating values for dip direction, α_I .

(f) Check on wedge geometry.

$$\begin{array}{ll} \text{No wedge} & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } pi_z < 0, \text{ or} \\ \text{is formed,} \\ \text{terminate} \\ \text{computation} \end{array} \right. \\ \text{or} & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } nq_i_z < 0 \\ \text{if } nq_i_z < 0 \end{array} \right. \end{array} \quad (\text{III.48})$$

$$\quad (\text{III.49})$$

$$\begin{array}{ll} \text{Tension} & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \epsilon \eta q_5 i_z < 0, \text{ or} \\ \text{crack} \\ \text{invalid,} \\ \text{terminate} \\ \text{computation} \end{array} \right. \\ \text{crack} & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } h_5 < 0, \text{ or} \\ \text{invalid,} \\ \text{terminate} \\ \text{computation} \end{array} \right. \\ \text{invalid,} & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \left[\frac{m_5 h_5}{m h}\right] > 1, \text{ or} \\ \text{terminate} \\ \text{computation} \end{array} \right. \\ \text{terminate} & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \left[\frac{n q_5 m_5 h_5}{n_5 q m h}\right] > 1 \end{array} \right. \end{array} \quad (\text{III.50})$$

$$\quad (\text{III.51})$$

$$\quad (\text{III.52})$$

$$\quad (\text{III.53})$$

(g) Areas of faces and weight of wedge.

$$A_1 = \frac{|mq|h^2| - |m_5 q_5|h_5^2}{2|p|} \quad (\text{III.54})$$

$$A_2 = \frac{(|q|m^2h^2/|n| - |q_5|m_5^2h_5^2/|n_5|)}{2|p|} \quad (\text{III.55})$$

$$A_5 = \frac{|m_5 q_5|h_5^2}{2|n_5|} \quad (\text{III.56})$$

$$W = \frac{\gamma \left(q^2 m^2 h^3 / |n| - q_5^2 m_5^2 h_5^3 / |n_5| \right)}{6|p|} \quad (\text{III.57})$$

(h) Water pressure.

(i) With no tension crack

$$u_1 = u_2 = \frac{\gamma_w h |m_i|}{6|p|} \quad (\text{III.58})$$

(ii) With tension crack

$$u_1 = u_2 = u_5 = \frac{\gamma_w h_5 |m_5|}{3d_z} \quad (\text{III.59})$$

$$V = u_5 A_5 \eta \left(\frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} \right) \quad (\text{III.60})$$

- (i) Effective normal reactions on planes 1 and 2 assuming contact on both planes.

$$\begin{aligned} N_1 &= \rho \{ W k_z + T(r v - s) \\ &\quad + E(r v_e - s_e) + V(r v_5 - s_5) \} \\ &\quad - u_1 A_1 \end{aligned} \quad (\text{III.61})$$

$$\begin{aligned} N_2 &= \mu \{ W l_z + T(r s - v) \\ &\quad + E(r s_e - v_e) + V(r s_5 - v_5) \} \\ &\quad - u_2 A_2 \end{aligned} \quad (\text{III.62})$$

- (j) Factor of safety when $N_1 < 0$ and $N_2 < 0$ (contact is lost on both planes).

$$FS = 0 \quad (\text{III.63})$$

- (k) If $N_1 > 0$ and $N_2 < 0$, contact is maintained on plane 1 only and the factor of safety is calculated as follows:

$$N_a = Wa_z - Ts - Es_e - Vs_5 - u_1 A_1 r \quad (\text{III.64})$$

$$S_x = (Tt_x + Ee_x + N_a a_x + Vf_{5x} + u_1 A_1 b_x) \quad (\text{III.65})$$

$$S_y = (Tt_y + Ee_y + N_a a_y + Vf_{5y} + u_1 A_1 b_y) \quad (\text{III.66})$$

$$\begin{aligned} S_z &= (Tt_z + Ee_z + N_a a_z \\ &\quad + Vf_{5z} + u_1 A_1 b_z) + W \end{aligned} \quad (\text{III.67})$$

$$S_a = (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2)^{1/2} \quad (\text{III.68})$$

$$Q_a = (N_a - u_1 A_1) \tan \phi_1 + c_1 A_1 \quad (\text{III.69})$$

$$FS_1 = \left(\frac{Q_a}{S_a} \right) \quad (\text{III.70})$$

- (l) If $N_1 < 0$ and $N_2 > 0$, contact is maintained on plane 2 only and the factor of safety is calculated as follows:

$$N_b = (Wb_z - Tv - Ev_e - Vs_5 - u_2 A_2 r) \quad (\text{III.71})$$

$$S_x = (Tt_x + Ee_x + N_b b_x + Vf_{5x} + u_2 A_2 a_x) \quad (\text{III.72})$$

$$S_y = (Tt_y + Ee_y + N_b b_y + Vf_{5y} + u_2 A_2 a_y) \quad (\text{III.73})$$

$$\begin{aligned} S_z &= (Tt_z + Ee_z + N_b b_z + Vf_{5z} \\ &\quad + u_2 A_2 a_z) + W \end{aligned} \quad (\text{III.74})$$

$$S_b = (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2)^{1/2} \quad (\text{III.75})$$

$$Q_b = (N_b - u_2 A_2) \tan \phi_2 + c_2 A_2 \quad (\text{III.76})$$

$$FS_2 = \left(\frac{Q_b}{S_b} \right) \quad (\text{III.77})$$

- (m) If $N_1 > 0$ and $N_2 > 0$, contact is maintained on both planes and the factor of safety is calculated as follows:

$$S = v(Wi_z - Tw - Ew_e - Vw_5) \quad (\text{III.78})$$

$$\begin{aligned} Q &= N_1 \tan \phi_1 + N_2 \tan \phi_2 \\ &\quad + c_1 A_1 + c_2 A_2 \end{aligned} \quad (\text{III.79})$$

$$FS_3 = \left(\frac{Q}{S} \right) \quad (\text{III.80})$$

- 2 Minimum factor of safety produced when load E of given magnitude is applied in the worst direction.

- (a) Evaluate $N''_1, N''_2, S'', Q'', FS''_3$ by use of equations (III.61), (III.62), (III.78), (III.79) and (III.80) with $E = 0$.

- (b) If $N'_1 < 0$ and $N'_2 < 0$, even before E is applied. Then $FS = 0$, terminate computation.

$$D = [(N'_1)^2 + (N'_2)^2 + 2 \left(\frac{mn}{|mn|} \right) N'_1 N'_2 r]^{1/2} \quad (\text{III.81})$$

$$\begin{aligned} \psi_e &= \arcsin \left\{ \left(-\frac{1}{G} \left(\frac{m}{|m|} \right) \cdot N''_1 a_z \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{n}{|n|} \cdot N''_2 b_z \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{III.82})$$

$$\alpha_e = \arctan \left\{ \frac{\frac{m}{|m|} \cdot N''_1 a_x + \frac{n}{|n|} \cdot N''_2 b_x}{\frac{m}{|m|} \cdot N''_1 a_y + \frac{n}{|n|} \cdot N''_2 b_y} \right\} \quad (\text{III.83})$$

If $E > D$, and E is applied in the direction ψ_e, α_e , or within a certain range encompassing this direction, then contact is lost on both planes and $FS = 0$. Terminate calculation.

- (d) If $N_1'' > 0$ and $N_2'' < 0$, assume contact on plane 1 only after application of E . Determine $S_x'', S_y'', S_z'', S_a'', Q_a'', FS_1''$ from equations (III.65) to (III.70) with $E = 0$. If $FS_1'' < 1$, terminate computation.

If $FS_1'' > 1$:

$$FS_1 = \frac{S_a'' Q_a'' - E[(Q_a'')^2 + ((S_a'')^2 - E^2) \tan^2 \phi_1]^{1/2}}{(S_a'')^2 - E^2} \quad (\text{III.84})$$

$$\psi_{e1} = \arcsin\left(\frac{S_z''}{S_a''}\right) - \arctan\left(\frac{\tan \phi_1}{(FS_1)}\right) \quad (\text{III.85})$$

$$\alpha_{e1} = \arctan\left(\frac{S_x''}{S_y''}\right) + 180^\circ \quad (\text{III.86})$$

- (e) If $N_1' < 0$ and $N_2' > 0$, assume contact on plane 2 only after application of E . Determine $S_x'', S_y'', S_z'', S_b'', Q_b'', FS_2''$ from equations (III.72) to (III.77) with $E = 0$. If $FS_2'' < 1$, terminate computation.

If $FS_2'' > 1$:

$$FS_2 = \frac{S_b'' Q_b'' - E[(Q_b'')^2 + ((S_b'')^2 - E^2) \tan^2 \phi_2]^{1/2}}{(S_b'')^2 - E^2} \quad (\text{III.87})$$

$$\psi_{e2} = \arcsin\left(\frac{S_z''}{S_b''}\right) - \arctan\left(\frac{\tan \phi_2}{(FS_2)}\right) \quad (\text{III.88})$$

$$\alpha_{e2} = \arctan\left(\frac{S_x''}{S_y''}\right) + 180^\circ \quad (\text{III.89})$$

- (f) If $N_1'' > 0$ and $N_2'' > 0$, assume contact on both planes after application of E . If $FS_3'' < 1$, terminate computation.

If $FS_3'' > 1$:

$$FS_3 = \frac{S'' Q'' - E[(Q'')^2 + B((S'')^2 - E^2)]^{1/2}}{(S'')^2 - E^2} \quad (\text{III.90})$$

$$\chi = \sqrt{B + (FS_3)^2} \quad (\text{III.91})$$

$$e_x = -\frac{((FS_3)v_i_x - \rho k_x \tan \phi_1 - \mu l_x \tan \phi_2)}{\chi} \quad (\text{III.92})$$

$$e_y = -\frac{((FS_3)v_i_y - \rho k_y \tan \phi_1 - \mu l_y \tan \phi_2)}{\chi} \quad (\text{III.93})$$

$$e_z = -\frac{((FS_3)v_i_z - \rho k_z \tan \phi_1 - \mu l_z \tan \phi_2)}{\chi} \quad (\text{III.94})$$

$$\psi_{e3} = \arcsin(-e_z) \quad (\text{III.95})$$

$$\alpha_{e3} = \arctan\left(\frac{e_x}{e_y}\right) \quad (\text{III.96})$$

Compute s_e and v_e using equations (III.26) and (III.27)

$$N_1 = N_1'' + E\rho(r v_e - s_e) \quad (\text{III.97})$$

$$N_2 = N_2'' + E\mu(r s_e - v_e) \quad (\text{III.98})$$

Check that $N_1 \geq 0$ and $N_2 \geq 0$

- 3 Minimum cable or bolt tension T_{\min} required to raise the factor of safety to some specified value FS .

- (a) Evaluate N'_1, N'_2, S', Q' by means of equations (III.61), (III.62), (III.78), (III.79) with $T = 0$.
- (b) If $N'_2 < 0$, contact is lost on plane 2 when $T = 0$. Assume contact on plane 1 only, after application on T . Evaluate S'_x, S'_y, S'_z, S'_a and Q'_a using equations (III.65) to (III.69) with $T = 0$.

$$T_1 = \frac{((FS)S'_a - Q'_a)}{\sqrt{(FS)^2 + \tan^2 \phi_1}} \quad (\text{III.99})$$

$$\psi_{11} = \arctan\left(\frac{\tan\phi_1}{(\text{FS})}\right) - \arcsin\left(\frac{S'_z}{S'_a}\right) \quad (\text{III.100})$$

$$\alpha_{11} = \arctan\left(\frac{S'_x}{S'_y}\right) \quad (\text{III.101})$$

- (a) If $N'_1 < 0$, contact is lost on plane 1 when $T = 0$. Assume contact on plane 2 only, after application of T . Evaluate S'_x, S'_y, S'_z, S'_b and Q'_b using equations (III.72) to (III.76) with $T = 0$.

$$T_2 = \frac{((\text{FS})S'_b - Q'_b)}{\sqrt{(\text{FS})^2 + \tan^2\phi_2}} \quad (\text{III.102})$$

$$\psi_{12} = \arctan\left(\frac{\tan\phi_2}{(\text{FS})}\right) - \arcsin\left(\frac{S'_z}{S'_b}\right) \quad (\text{III.103})$$

$$\alpha_{12} = \arctan\left(\frac{S'_x}{S'_y}\right) \quad (\text{III.104})$$

- (a) All cases. No restrictions on values of N'_1 and N'_2 . Assume contact on both planes after application of T .

$$\chi = \sqrt{((\text{FS})^2 + B)} \quad (\text{III.105})$$

$$T_3 = \frac{((\text{FS})S' - Q')}{\chi} \quad (\text{III.106})$$

$$t_x = \frac{((\text{FS})vi_x - \rho k_x \tan\phi_1 - \mu l_x \tan\phi_2)}{\chi} \quad (\text{III.107})$$

$$t_y = \frac{((\text{FS})vi_y - \rho k_y \tan\phi_1 - \mu l_y \tan\phi_2)}{\chi} \quad (\text{III.108})$$

$$t_z = \frac{((\text{FS})vi_z - \rho k_z \tan\phi_1 - \mu l_z \tan\phi_2)}{\chi} \quad (\text{III.109})$$

$$\psi_{13} = \arcsin(-t_z) \quad (\text{III.110})$$

$$\alpha_{13} = \arctan\left(\frac{t_x}{t_y}\right) \quad (\text{III.111})$$

Compute s and v using equations (III.23) and (III.24).

$$N_1 = N'_1 + T_3\rho(rv - s) \quad (\text{III.112})$$

$$N_2 = N'_2 + T_3\mu(rs - v) \quad (\text{III.113})$$

If $N_1 < 0$ or $N_2 < 0$, ignore the results of this section.

If $N'_1 > 0$ and $N'_2 > 0$, $T_{\min} = T_3$

If $N'_1 > 0$ and $N'_2 < 0$, T_{\min} = smallest of T_1, T_3

If $N'_1 < 0$ and $N'_2 > 0$, T_{\min} = smallest of T_2, T_3

If $N'_1 < 0$ and $N'_2 < 0$, T_{\min} = smallest of T_1, T_2, T_3

Example Calculate the factor of safety for the following wedge:

Plane	1	2	3	4	5
ψ	45	70	12	65	70
α	105	235	195	185	165

$$\eta = +1 \\ H_1 = 100 \text{ ft}, L = 40 \text{ ft}, c_1 = 500 \text{ lb/ft}^2, \\ c_2 = 1000 \text{ lb/ft}^2 \\ \phi_1 = 20^\circ, \phi_2 = 30^\circ, \gamma = 160 \text{ lb/ft}^3.$$

$$(1a) \quad T = 0, E = 0, u_1 = u_2 = u_5$$

u_5 calculated from equation (III.59).

$$(a_x, a_y, a_z) = (0.68301, -0.18301, 0.70711)$$

$$(b_x, b_y, b_z) = (-0.76975, -0.53899, 0.34202)$$

$$(d_x, d_y, d_z) = (-0.05381, -0.20083, 0.97815)$$

$$(f_x, f_y, f_z) = (-0.07899, -0.90286, 0.42262)$$

$$(f_{5x}, f_{5y}, f_{5z}) = (0.24321, -0.90767, 0.34202)$$

$$(g_x, g_y, g_z) = (-0.56107, 0.34451, 0.63112)$$

$$(g_{5x}, g_{5y}, g_{5z}) = (-0.57923, 0.061627, 0.57544)$$

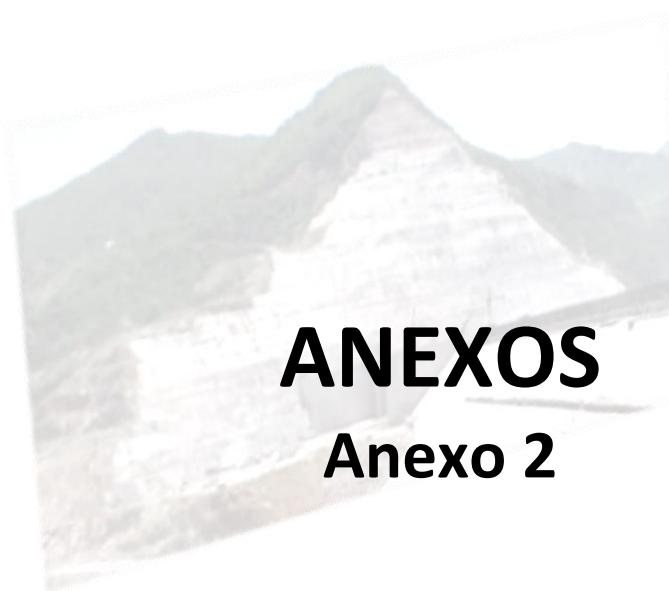
$$(i_x, i_y, i_z) = (-0.31853, 0.77790, 0.50901)$$

$$(j_x, j_y, j_z) = (-0.79826, 0.05452, -0.03272)$$

$$(j_{5x}, j_{5y}, j_{5z}) = (-0.81915, -0.25630, -0.09769)$$

$$(k_x, k_y, k_z) = (0.54041, -0.28287, 0.77047)$$

$$(l_x, l_y, l_z) = (-0.64321, -0.57289, 0.47302)$$



ANEXOS

Anexo 2

%Cálculo del factor de seguridad en un talud en cuña

'INGRESO DE DATOS'

```
Grieta=input('El talud tendrá Grieta de Tensión (SI(1) o NO(0)): ');
FE=input('Al Talud se le aplicará una fuerza de externa(SI(1) o NO(0)): ');
FT=input('Al Talud se le aplicará una fuerza de anclaje(SI(1) o NO(0)): ');
Agua=input('Se tomará en cuenta la presión del agua(SI(1) o NO(0)): '');
```

'Ingrrese Datos del Plano 1'

```
E1=input('Ingrrese el echado del plano 1: ');
R1=input('Ingrrese la dirección de echado plano 1: ');
C1=input('Ingrrese la cohesión del suelo del plano 1: ');
fi1=input('Ingrrese el ángulo de fricción del suelo del plano 1: '');
```

'Ingrrese Datos del Plano 2'

```
E2=input('Ingrrese el echado del plano 2: ');
R2=input('Ingrrese la dirección de echado plano 2: ');
C2=input('Ingrrese la cohesión del suelo del plano 2: ');
fi2=input('Ingrrese el ángulo de fricción del suelo del plano 2: '');
```

'Ingrrese Datos del Plano 3 (Corona del talud)'

```
E3=input('Ingrrese el echado del plano 3: ');
R3=input('Ingrrese la dirección de echado plano 3: '');
```

'Ingrrese Datos del Plano 4 (Cara del talud)'

```
E4=input('Ingrrese el echado del plano 4: ');
R4=input('Ingrrese la dirección de echado plano 4: '');
```

```
if Grieta==1
    'Ingrrese Datos del Plano 5 (Grieta de Tensión)'
    E5=input('Ingrrese el echado del plano 5: ');
    R5=input('Ingrrese la dirección de echado plano 5: ');
else E5=0;
    R5=0;
end
```

'Ingrrese datos generales acerca del talud'

```
hs=input('Geometría de la cara del talud (-1 si es sobresaliente, 1 si la cara no es sobresaliente): ');
H1=input('Altura del talud referenciada al plano 1: '');
```

```
if Grieta==1
    L=input('Distancia de la grieta de tensión, medida sobre el plano 1: ');
else
    L=0;
end
```

```
gs=input('Peso específico de la roca: ');
gsw=input('Peso específico del agua: '');
```

```
if FT==1
    FSR=input('Ingrrese el factor de seguridad que se requiera: ');
else E6=0;
    R6=0;
T=0;
```

ANEXO 2

end

```

if FE==1
    'Ingrese el valor de la fuerza externa que se aplicara'
    E=input('E = ');
else E7=0;
    R7=0;
    E=0;
end

```

%Cálculo de componentes de los vectores en las direcciones normales

```

v1=[(sin(E1*pi()/180)*sin(R1*pi()/180)),(sin(E1*pi()/180)*cos(R1*pi()/180)),cos(E1*pi()/180)];
v2=[(sin(E2*pi()/180)*sin(R2*pi()/180)),(sin(E2*pi()/180)*cos(R2*pi()/180)),cos(E2*pi()/180)];
v3=[(sin(E3*pi()/180)*sin(R3*pi()/180)),(sin(E3*pi()/180)*cos(R3*pi()/180)),cos(E3*pi()/180)];
v4=[(sin(E4*pi()/180)*sin(R4*pi()/180)),(sin(E4*pi()/180)*cos(R4*pi()/180)),cos(E4*pi()/180)];
v5=[(sin(E5*pi()/180)*sin(R5*pi()/180)),(sin(E5*pi()/180)*cos(R5*pi()/180)),cos(E5*pi()/180)];

```

%Componentes de los vectores en las líneas de intersección de varios planos

```

vg=[((v4(1,2)*v1(1,3))-(v4(1,3)*v1(1,2))),((v4(1,3)*v1(1,1))-(v4(1,1)*v1(1,3))),((v4(1,1)*v1(1,2))-
(v4(1,2)*v1(1,1))]];
vg5=[((v5(1,2)*v1(1,3))-(v5(1,3)*v1(1,2))),((v5(1,3)*v1(1,1))-(v5(1,1)*v1(1,3))),((v5(1,1)*v1(1,2))-
(v5(1,2)*v1(1,1))]];
vi=[((v2(1,2)*v1(1,3))-(v2(1,3)*v1(1,2))),((v2(1,3)*v1(1,1))-(v2(1,1)*v1(1,3))),((v2(1,1)*v1(1,2))-
(v2(1,2)*v1(1,1))]];
vj=[((v4(1,2)*v3(1,3))-(v4(1,3)*v3(1,2))),((v4(1,3)*v3(1,1))-(v4(1,1)*v3(1,3))),((v4(1,1)*v3(1,2))-
(v4(1,2)*v3(1,1))]];
vj5=[((v5(1,2)*v3(1,3))-(v5(1,3)*v3(1,2))),((v5(1,3)*v3(1,1))-(v5(1,1)*v3(1,3))),((v5(1,1)*v3(1,2))-
(v5(1,2)*v3(1,1))]];

```

%Vector entre la línea de intersección de los plano 1-2 con el plano 1

```
K=[((vi(1,2)*v2(1,3))-(vi(1,3)*v2(1,2))),((vi(1,3)*v2(1,1))-(vi(1,1)*v2(1,3))),((vi(1,1)*v2(1,2))-(vi(1,2)*v2(1,1)))];
```

%Vector entre la línea de intersección de los plano 1-2 con el plano 2

```
I=[((v1(1,2)*vi(1,3))-(v1(1,3)*vi(1,2))),((v1(1,3)*vi(1,1))-(v1(1,1)*vi(1,3))),((v1(1,1)*vi(1,2))-(v1(1,2)*vi(1,1)))];
```

%Números proporcionales a cosenos de varios ángulos

```

m=((vg(1,1)*v3(1,1))+(vg(1,2)*v3(1,2))+(vg(1,3)*v3(1,3)));
m5=((vg5(1,1)*v3(1,1))+(vg5(1,2)*v3(1,2))+(vg5(1,3)*v3(1,3)));
n=((v2(1,1)*vj(1,1))+(v2(1,2)*vj(1,2))+(v2(1,3)*vj(1,3)));
n5=((v2(1,1)*vj5(1,1))+(v2(1,2)*vj5(1,2))+(v2(1,3)*vj5(1,3)));
p=((vi(1,1)*v3(1,1))+(vi(1,2)*v3(1,2))+(vi(1,3)*v3(1,3)));
q=((v2(1,1)*vg(1,1))+(v2(1,2)*vg(1,2))+(v2(1,3)*vg(1,3)));
q5=((v2(1,1)*vg5(1,1))+(v2(1,2)*vg5(1,2))+(v2(1,3)*vg5(1,3)));
r=((v1(1,1)*v2(1,1))+(v1(1,2)*v2(1,2))+(v1(1,3)*v2(1,3)));

```

```

s5=((v1(1,1)*v5(1,1))+(v1(1,2)*v5(1,2))+(v1(1,3)*v5(1,3)));
vs5=((v2(1,1)*v5(1,1))+(v2(1,2)*v5(1,2))+(v2(1,3)*v5(1,3)));
w5=((vi(1,1)*v5(1,1))+(vi(1,2)*v5(1,2))+(vi(1,3)*v5(1,3)));
de=((vi(1,1)*vg(1,1))+(vi(1,2)*vg(1,2))+(vi(1,3)*vg(1,3)));
de5=((vi(1,1)*vg5(1,1))+(vi(1,2)*vg5(1,2))+(vi(1,3)*vg5(1,3)));
ep=((v4(1,1)*v5(1,1))+(v4(1,2)*v5(1,2))+(v4(1,3)*v5(1,3)));

```

```
%Diversos Factores
R=(1-(r^2))^0.5;
rs=(1/(R^2))*((n*q)/(abs(n*q)));
ms=(1/(R^2))*((m*q)/(abs(m*q)));
us=(1/R)*((p)/abs(p));
G=(vg(1,1))^2+(vg(1,2))^2+(vg(1,3))^2;
G5=(vg5(1,1))^2+(vg5(1,2))^2+(vg5(1,3))^2;
M=((G*p^2)-(2*m*p*de)+(m^2)*(R^2)))^0.5;
M5=((G5*p^2)-(2*m5*p*de5)+(m5^2)*(R^2)))^0.5;
h=(H1/abs((vg(1,3))));
h5=(((M*h)-(L*(abs(p))))/M5);
B=((tan(fi1*pi/180))^2)+((tan(fi2*pi/180))^2)-(2*((ms*r)/rs)*(tan(fi1*pi/180))*(tan(fi2*pi/180)))/(R^2);

%Tendencia de la línea de respecto de los planos 1 y 2'
yis=(asin(us*vi(1,3)))*(180/pi);
ais=180+atan((-us*vi(1,1))/(-us*vi(1,2)))*(180/pi);

if FT==0 && FE==0
    if Grieta==1
        if ((p*vi(1,3))>0) && ((n*q*vi(1,3))>0) && ((ep*hs*q5*vi(1,3))>0) && h5>0 && (abs((m5*h5)/(m*h))< 1)
        &&
            (abs((n*q5*m5*h5)/(m*h*n5*q))< 1)
        'La cuña cumple con las condiciones de forma y la grieta de tensión igual'
        'Áreas de los planos y peso de la cuña'
        A1=((m*q*h^2)-(m5*q5*h5^2))/(2*abs(p))
        A2=((abs(q)*(m^2)*(h^2))/(abs(n)))-((abs(q5)*(m5^2)*(h5^2))/(abs(n5)))/(2*abs(p))
        A5=(abs(m5*q5)*h5^2)/(2*(abs(n5)))
        W=(gs*((q^2)*(m^2)*(h^3))/(abs(n)))-((q5^2)*(m5^2)*(h5^3))/(abs(n5)))/(6*abs(p))

        'Presión de la Grieta de Tensión sobre los planos 1, 2 y Grieta';
        if Agua==1
            u1=(gsw*h5*abs(m5))/(3*v3(1,3));
            V=u1*A5*hs*(ep/abs(ep));
        else
            u1=0;
            V=0;
        end

        'Reacciones Normales en planos 1 y 2 ';
        N1=(rs*((W*K(1,3))+(V*((vs5*r)-s5)))-(u1*A1));
        N2=(ms*((W*I(1,3))+(V*((s5*r)-vs5)))-(u1*A2));

        'Cálculo del factor de seguridad';
        if N1<0 && N2<0
            'FS = 0 , Debido a que se pierde el contacto en ambos planos'
        else
            if N1>0 && N2>0
                'El contacto del talud se mantiene en ambos planos'
                N1=(rs*((W*K(1,3))+(V*((vs5*r)-s5)))-(u1*A1))
                N2=(ms*((W*I(1,3))+(V*((s5*r)-vs5)))-(u1*A2))
                S=us*((W*vi(1,3))-(V*w5))
                Q=(N1*tan(fi1*pi/180))+(N2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2)
            end
        end
    end
end
```

```

FS3=Q/S
else
if N1>0 && N2<0
'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 1'
Na=(W*v1(1,3))-(V*s5)-(u1*A2*r)
Sx=-((Na*v1(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
Sy=-((Na*v1(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
Sz=-((Na*v1(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
Sa=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2))
Qa=((Na-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1)
FS1=Qa/Sa
else
'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 2'
Nb=(W*v2(1,3))-(V*vs5)-(u1*A1*r)
Sx=-((Nb*v2(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
Sy=-((Nb*v2(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
Sz=-((Nb*v2(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
Sb=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2))
Qb=((Nb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2)
FS2=Qb/Sb
end
end
end
else ('Forma de la cuña es invalida - Calculo Terminado');
end
else
if ((p*vi(1,3))>0) && ((n*q*vi(1,3))>0)
'La cuña cumple con las condiciones de forma y la grieta de tensión igual'
'Áreas de los planos y peso de la cuña'
A1=((m*q*h^2))/(2*abs(p))
A2=((abs(q)*(m^2)*(h^2))/(abs(n)))/(2*abs(p))
W=(gs*((q^2)*(m^2)*(h^3))/(abs(n)))/(6*abs(p))

'Presión de la Grieta de Tensión sobre los planos 1, 2 y Grieta';
if Agua==1
u1=(gsw*h*abs(m*vi(1,3)))/(6*abs(p));
else
u1=0;
end

'Reacciones Normales en planos 1 y 2 ';
N1=(rs*(W*K(1,3)))-(u1*A1);
N2=(ms*(W*I(1,3)))-(u1*A2);

'Cálculo del factor de seguridad';
if N1<0 && N2<0
'FS = 0 , Debido a que se pierde el contacto en ambos planos'
else
if N1>0 && N2>0
'El contacto del talud se mantiene en ambos planos'
N1=(rs*(W*K(1,3)))-(u1*A1)
N2=(ms*(W*I(1,3)))-(u1*A2)

```

ANEXO 2

```

S=us*((W*vi(1,3)))
Q=(N1*tan(fi1*pi/180))+(N2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2)
FS3=Q/S
else
  if N1>0 && N2<0
    'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 1'
    Na=(W*v1(1,3))-(u1*A2*r)
    Sx=-((Na*v1(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
    Sy=-((Na*v1(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
    Sz=-((Na*v1(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
    Sa=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2))
    Qa=((Na-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1)
    FS1=Qa/Sa

    else
      'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 2'
      Nb=(W*v2(1,3))-(u1*A1*r)
      Sx=-((Nb*v2(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
      Sy=-((Nb*v2(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
      Sz=-((Nb*v2(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
      Sb=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2))
      Qb=((Nb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2)
      FS2=Qb/Sb
    end
  end
end
else ('Forma de la cuña es invalida - Calculo Terminado');
end
end
else
  if FT==0 && FE==1
    if Grieta==1
      if ((p*vi(1,3))>0) && ((n*q*vi(1,3))>0) && ((ep*hs*q5*vi(1,3))>0) && h5>0 && (abs((m5*h5)/(m*h))<1) &&
        (abs((n*q5*m5*h5)/(m*h*n5*q))< 1)
        'La cuña cumple con las condiciones de forma y la grieta de tensión igual'
        'Cálculo de Áreas de los planos y peso de la cuña'
        A1=((m*q*h^2)-(m5*q5*h5^2))/(2*abs(p))
        A2=((abs(q)*(m^2)*(h^2))/(abs(n))-((abs(q5)*(m5^2)*(h5^2))/(abs(n5)))/(2*abs(p)))
        A5=(abs(m5*q5)*h5^2)/(2*(abs(n5)))
        W=(gs*(((q^2)*(m^2)*(h^3))/(abs(n)))-(((q5^2)*(m5^2)*(h5^3))/(abs(n5))))/(6*abs(p))
        'Presión de la Grieta de Tensión sobre los planos 1, 2 y Grieta';
        if Agua==1
          u1=(gsw*h5*abs(m5))/(3*v3(1,3));
          V=u1*A5*hs*(ep/abs(ep));
        else
          u1=0;
          V=0;
        end
        'Reacciones Normales en planos 1 y 2';
        N1=(rs*((W*K(1,3))+((V*(vs5*r)-s5)))-(u1*A1);
        N2=(ms*((W*I(1,3))+((V*(s5*r)-vs5)))-(u1*A2);
        'Cálculo del factor de seguridad';
    end
  end
end

```

```

if N1<0 && N2<0
    'FS = 0 , Debido a que se pierde el contacto en ambos planos'
else
    if N1>0 && N2>0
        'El contacto del talud se mantiene sobre ambos planos'
        EN1=(rs*((W*K(1,3))+(V*((vs5*r)-s5)))-(u1*A1);
        EN2=(ms*((W*I(1,3))+(V*((s5*r)-vs5)))-(u1*A2);
        ES=us*((W*vi(1,3))-(V*w5));
        EQ=(EN1*tan(fi1*pi/180))+(EN2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2);
        EFS3=EQ/ES;
        if EFS3>1
            FS3=((ES*EQ)-(E*((EQ^2)+(B*((ES^2)-(E^2))))^0.5))/((ES^2)-(E^2))
            X=sqrt(B+FS3^2);
            ex=-(((FS3*us*vi(1,1))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,1)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,1)*ms))/(X));
            ey=-(((FS3*us*vi(1,2))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,2)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,2)*ms))/(X));
            ez=-(((FS3*us*vi(1,3))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,3)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,3)*ms))/(X));
            E7=asin(-ez)*180/pi
            if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
                R7=(atan(ex/ey)*180/pi)
            else
                if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
                    R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+180
                else
                    if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
                        R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+180
                    else
                        R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+360
                    end
                end
            end
        end
    end

v7=[ex,ey,ez];
se=(v1(1,1)*v7(1,1)+(v1(1,2)*v7(1,2)+(v1(1,3)*v7(1,3)));
vse=((v2(1,1)*v7(1,1)+(v2(1,2)*v7(1,2)+(v2(1,3)*v7(1,3)));
we=((vi(1,1)*v7(1,1)+(vi(1,2)*v7(1,2)+(vi(1,3)*v7(1,3)));

N1=(rs*((W*K(1,3))+(E*((r*vse)-se))+(V*((vs5*r)-s5)))-(u1*A1)
N2=(ms*((W*I(1,3))+(E*((r*se)-vse))+(V*((s5*r)-vs5)))-(u1*A2)
S=us*((W*vi(1,3))-(E*we)-(V*w5))
Q=(N1*tan(fi1*pi/180))+(N2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2)
VFS3=Q/S;

else 'El factor de seguridad FS1 < 1 - Cálculo Terminado'
end
else
    if N1>0 && N2<0
        'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 1'
        ENa=(W*vi(1,3)-(V*s5)-(u1*A2*r);
        ESx=-((ENa*v1(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
        ESy=-((ENa*v1(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
        ESz=-((ENa*v1(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
        ESa=sqrt((ESx^2)+(ESy^2)+(ESz^2));
    end
end

```

ANEXO 2

```

EQa=((ENa-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);
EFS1=EQa/ESa;

if EFS1>1
FS1=((ESa*EQa)-(E*((EQa^2)+(((ESa^2)-(E^2))*(tan(fi1*pi/180)^2))^0.5))/((ESa^2)-(E^2));
E7=(asin(ESz/ESa)*180/pi)-(atan((tan(fi1*pi/180))/(FS1))*180/pi)
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)
else
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+180
else
if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+180
else
R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+360
end
end
end

v7=[(cos(E7*pi/180)*sin(R7*pi/180)),(cos(E7*pi/180)*cos(R7*pi/180),-sin(E7*pi/180)];
se=(v1(1,1)*v7(1,1)+(v1(1,2)*v7(1,2))+(v1(1,3)*v7(1,3)));
vse=(v2(1,1)*v7(1,1)+(v2(1,2)*v7(1,2))+(v2(1,3)*v7(1,3)));
we=(vi(1,1)*v7(1,1)+(vi(1,2)*v7(1,2))+(vi(1,3)*v7(1,3)));

Na=(W*v1(1,3))-(E*se)-(V*s5)-(u1*A2*r)
Sx=-((E*v7(1,1))+(Na*v1(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
Sy=-((E*v7(1,2))+(Na*v1(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
Sz=-((E*v7(1,3))+(Na*v1(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
Sa=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2))
Qa=((Na-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1)
FS1=Qa/Sa

else 'El factor de seguridad FS1 < 1 - Cálculo Terminado'
end
else
'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 2'
ENb=(W*v2(1,3))-(V*s5)-(u1*A1*r);
ESx=-((ENb*v2(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
ESy=-((ENb*v2(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
ESz=-((ENb*v2(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
ESb=sqrt((ESx^2)+(ESy^2)+(ESz^2));
EQb=((ENb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);
EFS2=EQb/ESb;

if EFS2>1
FS2=((ESb*EQb)-(E*((EQb^2)+(((ESb^2)-(E^2))*(tan(fi1*pi/180)^2))^0.5))/((ESb^2)-(E^2));
E7=(asin(ESz/ESb)*180/pi)-(atan((tan(fi2*pi/180))/(FS2))*180/pi)
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)
else

```

```

if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
    R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+180
else
    if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
        R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+180
    else
        R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+360
    end
end
end

v7=[(cos(E7*pi()/180)*sin(R7*pi()/180)),(cos(E7*pi()/180)*cos(R7*pi()/180))-sin(E7*pi()/180)];
se=((v1(1,1)*v7(1,1))+(v1(1,2)*v7(1,2))+(v1(1,3)*v7(1,3)));
vse=((v2(1,1)*v7(1,1))+(v2(1,2)*v7(1,2))+(v2(1,3)*v7(1,3)));
we=((vi(1,1)*v7(1,1))+(vi(1,2)*v7(1,2))+(vi(1,3)*v7(1,3)));

Nb=(W*v2(1,3))-(E*vse)-(V*vs5)-(u1*A1*r)
Sx=-((E*v7(1,1))+(Nb*v2(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
Sy=-((E*v7(1,2))+(Nb*v2(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
Sz=-((E*v7(1,3))+(Nb*v2(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
Sb=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2))
Qb=((Nb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2)
FS2=Qb/Sb

else 'El factor de seguridad FS1 < 1 - Cálculo Terminado'
end
end
end
else
    'Forma de la cuña o grieta de tensión invalida - Calculo Terminado'
end
else
    if((p*vi(1,3))>0) && ((n*q*vi(1,3))>0)
        ('La cuña cumple con las condiciones de forma y la grita de tensión igual')
        A1=((m*q*h^2))/(2*abs(p))
        A2=((abs(q)*(m^2)*(h^2))/(abs(n)))/(2*abs(p))
        W=(gs*((q^2)*(m^2)*(h^3))/(abs(n)))/(6*abs(p))
        'Presión de la Grieta de Tensión sobre los planos 1 y 2';
        if Agua==1
            u1=(gsw*h*abs(m*vi(1,3)))/(6*abs(p));
        else
            u1=0;
        end
    'Reacciones Normales en planos 1 y 2 ';
    N1=(rs*(W*K(1,3)))-(u1*A1);
    N2=(ms*(W*I(1,3)))-(u1*A2);

    'Cálculo del factor de seguridad';
    if N1<0 && N2<0

```

```

'FS = 0 , Debido a que se pierde el contacto en ambos planos'
else
    if N1>0 && N2>0
        'El contacto del talud se mantiene sobre ambos planos'
        EN1=(rs*((W*K(1,3)))-(u1*A1);
        EN2=(ms*((W*I(1,3)))-(u1*A2);
        ES=us*((W*vi(1,3)));
        EQ=(EN1*tan(fi1*pi/180))+(EN2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2);
        EFS3=EQ/ES;
        if EFS3>1
            FS3=((ES*EQ)-(E*((EQ^2)+(B*(ES^2)-(E^2))))^0.5)/((ES^2)-(E^2))
            X=sqrt(B+FS3^2);
            ex=-((FS3*us*vi(1,1))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,1)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,1)*ms))/(X);
            ey=-((FS3*us*vi(1,2))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,2)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,2)*ms))/(X);
            ez=-((FS3*us*vi(1,3))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,3)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,3)*ms))/(X));
            E7=asin(-ez)*180/pi
        if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
            R7=(atan(ex/ey)*180/pi)
        else
            if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
                R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+180
            else
                if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
                    R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+180
                else
                    R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+360
                end
            end
        end
    end
    v7=[ex,ey,ez];
    se=((v1(1,1)*v7(1,1))+(v1(1,2)*v7(1,2))+(v1(1,3)*v7(1,3)));
    vse=((v2(1,1)*v7(1,1))+(v2(1,2)*v7(1,2))+(v2(1,3)*v7(1,3)));
    we=((vi(1,1)*v7(1,1))+(vi(1,2)*v7(1,2))+(vi(1,3)*v7(1,3)));

    N1=(rs*((W*K(1,3))+(E*((r*vse)-se)))-(u1*A1)
    N2=(ms*((W*I(1,3))+(E*((r*se)-vse)))-(u1*A2)
    S=us*((W*vi(1,3))-(E*we))
    Q=(N1*tan(fi1*pi/180))+(N2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2)
    VFS3=Q/S;

else 'El factor de seguridad FS1 < 1 - Cálculo Terminado'
end
else
    if N1>0 && N2<0
        'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 1'
        ENa=(W*v1(1,3))-(u1*A2*r);
        ESx=-((ENa*v1(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
        ESy=-((ENa*v1(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
        ESz=-((ENa*v1(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
        ESA=sqrt((ESx^2)+(ESy^2)+(ESz^2));
        EQa=((ENa-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);
        EFS1=EQa/ESA;

```

```

if EFS1>1
    FS1=((ESa*EQa)-(E*((EQa^2)+((ESa^2)-(E^2))*(tan(fi1*pi/180)^2)))^0.5)/((ESa^2)-(E^2));
    E7=(asin(ESz/ESa)*180/pi)-(atan((tan(fi1*pi/180))/(FS1))*180/pi)
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
        R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)
    else
        if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
            R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+180
        else
            if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
                R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+180
            else
                R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+360
            end
        end
    end
v7=[(cos(E7*pi/180)*sin(R7*pi/180)),(cos(E7*pi/180)*cos(R7*pi/180)),-(sin(E7*pi/180))];

se=((v1(1,1)*v7(1,1)+(v1(1,2)*v7(1,2)+(v1(1,3)*v7(1,3)));
vse=((v2(1,1)*v7(1,1)+(v2(1,2)*v7(1,2)+(v2(1,3)*v7(1,3)));
we=((vi(1,1)*v7(1,1)+(vi(1,2)*v7(1,2)+(vi(1,3)*v7(1,3)));

Na=(W*v1(1,3))-(E*se)-(u1*A2*r)
Sx=-((E*v7(1,1))+(Na*v1(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
Sy=-((E*v7(1,2))+(Na*v1(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
Sz=-((E*v7(1,3))+(Na*v1(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
Sa=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2))
Qa=((Na-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1)
FS1=Qa/Sa

else 'El factor de seguridad FS1 < 1 - Cálculo Terminado'
end
else
    'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 2'
    ENb=(W*v2(1,3))-(u1*A1*r);
    ESx=-((ENb*v2(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
    ESy=-((ENb*v2(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
    ESz=-((ENb*v2(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
    ESb=sqrt((ESx^2)+(ESy^2)+(ESz^2));
    EQb=((ENb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);
    EFS2=EQb/ESb;

if EFS2>1
    FS2=((ESb*EQb)-(E*((EQb^2)+((ESb^2)-(E^2))*(tan(fi2*pi/180)^2)))^0.5)/((ESb^2)-(E^2));
    E7=(asin(ESz/ESb)*180/pi)-(atan((tan(fi2*pi/180))/(FS2))*180/pi)
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
        R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)
    else
        if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
            R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+180
        else
            R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+360
        end
    end
end

```

```

else
    if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
        R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+180
    else
        R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+360
    end
end
end

v7=[(cos(E7*pi/180)*sin(R7*pi/180)),(cos(E7*pi/180)*cos(R7*pi/180)), -sin(E7*pi/180)];


se=(v1(1,1)*v7(1,1))+(v1(1,2)*v7(1,2))+(v1(1,3)*v7(1,3));
vse=(v2(1,1)*v7(1,1))+(v2(1,2)*v7(1,2))+(v2(1,3)*v7(1,3));
we=(vi(1,1)*v7(1,1))+(vi(1,2)*v7(1,2))+(vi(1,3)*v7(1,3));

Nb=(W*v2(1,3))-(E*vse)-(u1*A1*r)
Sx=-((E*v7(1,1))+(Nb*v2(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
Sy=-((E*v7(1,2))+(Nb*v2(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
Sz=-((E*v7(1,3))+(Nb*v2(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
Sb=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2))
Qb=((Nb-(u1*A2))*tan(pi/180))+C2*A2
FS2=Qb/Sb

else 'El factor de seguridad FS1 < 1 - Cálculo Terminado'
end
end
end
else
    'Forma de la cuña es invalida - Calculo Terminado'
end
end

else
    if FT==1 && FE==0
        if Grieta==1
            if ((p*vi(1,3))>0) && ((n*q*vi(1,3))>0) && ((ep*hs*q5*vi(1,3))>0) && h5>0 &&
            (abs((m5*h5)/(m*h))< 1) &&
            (abs((n*q5*m5*h5)/(m*h*n5*q))< 1)

            'La cuña cumple con las condiciones de forma y la grieta de tensión igual'
            'Áreas de los planos y peso de la cuña'
            A1=((m*q*h^2)-(m5*q5*h5^2))/(2*abs(p))
            A2=((abs(q)*(m^2)*(h^2))/(abs(n)))-((abs(q5)*(m5^2)*(h5^2))/(abs(n5)))/(2*abs(p))
            A5=(abs(m5*q5)*h5^2)/(2*(abs(n5)))
            W=(gs*(((q^2)*(m^2)*(h^3))/(abs(n)))-(((q5^2)*(m5^2)*(h5^3))/(abs(n5))))/(6*abs(p))

            'Presión de la Grieta de Tensión sobre los planos 1, 2 y Grieta';
            if Agua==1
                u1=(gsw*h5*abs(m5))/(3*v3(1,3));
                V=u1*A5*hs*(ep/abs(ep));
            else

```

```

u1=0;
V=0;
end

'Reacciones Normales en planos 1 y 2';
N1=(rs*((W*K(1,3))+(V*((vs5*r)-s5))))-(u1*A1);
N2=(ms*((W*I(1,3))+(V*((s5*r)-vs5))))-(u1*A2);

'Cálculo del factor de seguridad';
if N1<0 && N2<0
    'FS = 0 , Debido a que se pierde el contacto en ambos planos'
else
    if N1>0 && N2>0
        'El contacto del talud se mantiene en ambos planos'
        TN1=(rs*((W*K(1,3))+(V*((vs5*r)-s5))))-(u1*A1);
        TN2=(ms*((W*I(1,3))+(V*((s5*r)-vs5))))-(u1*A2);
        TS=us*((W*vi(1,3))-(V*w5));
        TQ=(TN1*tan(fi1*pi/180)+(TN2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2));
        if TQ/TS>FSR;
            El factor de seguridad sin fuerza de anclaje es mayor al factor de seguridad
            propuesto'
            FS3=TQ/TS
        else
            X=(FSR^2 + B)^0.5;
            T3=((FSR*TS)-TQ)/X
            tx=((FSR*us*vi(1,1))-(tan(fi1*pi/180)*K(1,1)*rs)-
            ((tan(fi2*pi/180)*I(1,1)*ms))/(X));
            ty=((FSR*us*vi(1,2))-(tan(fi1*pi/180)*K(1,2)*rs)-
            ((tan(fi2*pi/180)*I(1,2)*ms))/(X));
            tz=((FSR*us*vi(1,3))-(tan(fi1*pi/180)*K(1,3)*rs)-
            ((tan(fi2*pi/180)*I(1,3)*ms))/(X));
            E6=asin(-tz)*180/pi
            if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
                R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+180
            else
                if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
                    R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+360
                else
                    if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
                        R6=(atan(tx/ty)*180/pi)
                    else
                        R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+180
                    end
                end
            end
        end

'Verificación';
v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180))-sin(E6*pi()/180)];

s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=(v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3));

```

```

w=((vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3)));

N1=(rs*((W*K(1,3))+(T3*((r*v)-s))+(V*((vs5*r)-s5)))-(u1*A1);
N2=(rs*((W*I(1,3))+(T3*((r*s)-v))+(V*((s5*r)-vs5)))-(u1*A2);
S=us*((W*vi(1,3))-(T3*w)-(V*w5))
Q=(N1*tan(fi1*pi/180))+(N2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2)
VFS3=Q/S;
end
else
if N1>0 && N2<0
'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 1'
TNa=(W*v1(1,3)-(V*s5)-(u1*A2*r));
TSx=-((TNa*v1(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
TSy=-((TNa*v1(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
TSz=-((TNa*v1(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
TSa=sqrt((TSx^2)+(TSy^2)+(TSz^2));
TQa=((TNa-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);
if TQa/TSa>FSR
'El factor de seguridad es mayor al factor de seguridad propuesto'
FS1=TQa/TSa
else
T1=((FSR*TSa)-TQa)/sqrt((FSR^2)+(tan(fi1*pi/180)^2)
E6=atan(((tan(fi1*pi/180))/(FSR))*180/pi)-(asin(TSz/TSa)*180/pi)
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
else
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+360
else
if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)
else
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
end
end
end
end

'Verificación';
v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180))-sin(E6*pi()/180)];

s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=((v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3)));
w=((vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3)));

Na=(W*v1(1,3)-(T1*s)-(V*s5)-(u1*A2*r));
Sx=-((Na*v1(1,1))+(T1*v6(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
Sy=-((Na*v1(1,2))+(T1*v6(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
Sz=-((Na*v1(1,3))+(T1*v6(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
Sa=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2));
Qa=((Na-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);

```

```

FS1=Qa/Sa;
end
else
'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 2'
TNb=(W*v2(1,3)-(V*vs5)-(u1*A2*r);
TSx=-((TNb*v2(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
TSy=-((TNb*v2(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
TSz=-((TNb*v2(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
TSb=sqrt((TSx^2)+(TSy^2)+(TSz^2));
TQb=((TNb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);
TFS2=TQb/TSb;
if TQb/TSb>FSR
'El factor de seguridad es mayor al factor de seguridad propuesto'
FS2=TQb/TSb
else
T2=((FSR*TSb)-TQb)/((FSR^2)+(tan(fi2*pi/180))^2)^0.5
E6=atan(((tan(fi2*pi/180))/FSR)*180/pi)-(asin(TSz/TSb)*180/pi)
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
else
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+360
else
if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
else
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
end
end
end
end

'Verificación';

v6=[(cos(E6*pi/180)*sin(R6*pi/180)),(cos(E6*pi/180)*cos(R6*pi/180)),-(sin(E6*pi/180))];

s=(v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3));
v=(v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3));
w=(vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3));

Nb=(W*v2(1,3))-(T2*v)-(V*vs5)-(u1*A2*r);
Sx=-((Nb*v2(1,1))+(T2*v6(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
Sy=-((Nb*v2(1,2))+(T2*v6(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
Sz=-((Nb*v2(1,3))+(T2*v6(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
Sb=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2));
Qb=((Nb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);
FS2=Qb/Sb;
end
end
end
end
else ('Forma de la cuña es invalida - Calculo Terminado');
end

```

```

else
if ((p*vi(1,3))>0) && ((n*q*vi(1,3))>0)

'La cuña cumple con las condiciones de forma y la grieta de tensión igual'
'Áreas de los planos y peso de la cuña'
A1=((m*q*h^2))/(2*abs(p))
A2=((abs(q)*(m^2)*(h^2))/(abs(n)))/(2*abs(p))
W=(gs*(((q^2)*(m^2)*(h^3))/(abs(n))))/(6*abs(p))

'Presión de la Grieta de Tensión sobre los planos 1, 2 y Grieta';
if Agua==1
    u1=(gsw*h*abs(m*vi(1,3)))/(6*abs(p));
else
    u1=0;
end

'Reacciones Normales en planos 1 y 2 ';
N1=(rs*(W*K(1,3)))-(u1*A1);
N2=(ms*(W*I(1,3)))-(u1*A2);

'Cálculo del factor de seguridad';
if N1<0 && N2<0
    ' FS = 0 , Debido a que se pierde el contacto en ambos planos'
else
    if N1>0 && N2>0
        'El contacto del talud se mantiene en ambos planos'
        TN1=(rs*((W*K(1,3)))-(u1*A1);
        TN2=(ms*((W*I(1,3)))-(u1*A2);
        TS=us*((W*vi(1,3)));
        TQ=(TN1*tan(fi1*pi/180))+(TN2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2);
        if TQ/TS>FSR
            'El factor de seguridad sin fuerza de anclaje es mayor al factor de seguridad propuesto'
            FS3=TQ/TS
        else
            X=(FSR^2 + B)^0.5;
            T3=((FSR*TS)-TQ)/X
            tx=((FSR*us*vi(1,1))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,1)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,1)*ms))/(X);
            ty=((FSR*us*vi(1,2))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,2)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,2)*ms))/(X);
            tz=((FSR*us*vi(1,3))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,3)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,3)*ms))/(X);
            E6=asin(-tz)*180/pi
            if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
                R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+180
            else
                if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
                    R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+360
                else
                    if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
                        R6=(atan(tx/ty)*180/pi)
                    else
                        R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+180
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

end

'Verificación'

v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180))-sin(E6*pi()/180)];

s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=((v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3)));
w=(vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3));

N1=(rs*((W*K(1,3))+(T3*((r*v)-s)))-(u1*A1));
N2=(rs*((W*I(1,3))+(T3*((r*s)-v)))-(u1*A2));
S=us*((W*vi(1,3))-(T3*w));
Q=(N1*tan(fi1*pi/180))+(N2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2);
FS3=Q/S;

end
else
if N1>0 && N2<0
'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 1'
TNa=(W*v1(1,3))-(u1*A2*r);
TSx=-((TNa*v1(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
TSy=-((TNa*v1(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
TSz=-((TNa*v1(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
TSa=sqrt((TSx^2)+(TSy^2)+(TSz^2));
TQa=((TNa-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);
if TQa/TSa>FSR
'El factor de seguridad es mayor al factor de seguridad propuesto'
FS1=TQa/TSa
else
T1=((FSR*TSa)-TQa)/sqrt((FSR^2)+(tan(fi1*pi/180))^2)
E6=atan(((tan(fi1*pi/180))/(FSR)*180/pi)-(asin(TSz/TSa)*180/pi)
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
else
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+360
else
if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)
else
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
end
end
end
end

'Verificación';

v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180))-sin(E6*pi()/180)];

```

ANEXO 2

```

s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=((v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3)));
w=((vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3)));

Na=(W*v1(1,3))-(T1*s)-(u1*A2*r);
Sx=-((Na*v1(1,1))+(T1*v6(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
Sy=-((Na*v1(1,2))+(T1*v6(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
Sz=-((Na*v1(1,3))+(T1*v6(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
Sa=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2));
Qa=((Na-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);
FS1=Qa/Sa;

end
else
'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 2'
TNb=(W*v2(1,3))-(u1*A1*r);
TSx=-((TNb*v2(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
TSy=-((TNb*v2(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
TSz=-((TNb*v2(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
TSb=sqrt((TSx^2)+(TSy^2)+(TSz^2));
TQb=((TNb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);
TFS2=TQb/TSb;
if TQb/TSb>FSR
'El factor de seguridad es mayor al factor de seguridad propuesto'
FS2=TQb/TSb
else
T2=((FSR*TSb)-TQb)/sqrt((FSR^2)+(tan(fi2*pi/180))^2)
E6=atan(((tan(fi2*pi/180))/(FSR))*180/pi)-(asin(TSz/TSb)*180/pi)
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
else
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+360
else
if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)
else
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
end
end
end
end

'Verificación';

v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180)),-
sin(E6*pi()/180)];

s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=((v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3)));
w=((vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3)));

Nb=(W*v2(1,3))-(T2*v)-(u1*A1*r);

```

```

Sx=-((Nb*v2(1,1))+(T2*v6(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
Sy=-((Nb*v2(1,2))+(T2*v6(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
Sz=-((Nb*v2(1,3))+(T2*v6(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
Sb=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2));
Qb=((Nb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);
FS2=Qb/Sb;
end
end
end
else ('Forma de la cuña es invalida - Calculo Terminado');
end
end
else
if Grieta==1
if ((p*vi(1,3))>0) && ((n*q*vi(1,3))>0) && ((ep*hs*q5*vi(1,3))>0) && h5>0 &&
(abs((m5*h5)/(m*h))< 1) &&
(abs((n*q5*m5*h5)/(m*h*h5*q))< 1)
'La cuña cumple con las condiciones de forma y la grieta de tensión igual'
'Cálculo de Áreas de los planos y peso de la cuña'
A1=((m*q*h^2)-(m5*q5*h5^2))/(2*abs(p))
A2=((abs(q)*(m^2)*(h^2))/(abs(n)))-((abs(q5)*(m5^2)*(h5^2))/(abs(n5)))/(2*abs(p))
A5=(abs(m5*q5)*h5^2)/(2*(abs(n5)))
W=(gs*(((q^2)*(m^2)*(h^3))/(abs(n)))-((q5^2)*(m5^2)*(h5^3))/(abs(n5)))/(6*abs(p))
'Presión de la Grieta de Tensión sobre los planos 1, 2 y Grieta';
if Agua==1
u1=(gsw*h5*abs(m5))/(3*v3(1,3));
V=u1*A5*hs*(ep/abs(ep));
else
u1=0;
V=0;
end
'Reacciones Normales en planos 1 y 2';
N1=(rs*((W*K(1,3))+(V*((vs5*r)-s5)))-(u1*A1));
N2=(ms*((W*I(1,3))+(V*((s5*r)-vs5)))-(u1*A2));
'Cálculo del factor de seguridad';
if N1<0 && N2<0
'FS = 0 , Debido a que se pierde el contacto en ambos planos'
else
if N1>0 && N2>0
'El contacto del talud se mantiene sobre ambos planos'
EN1=(rs*((W*K(1,3))+(V*((vs5*r)-s5)))-(u1*A1));
EN2=(ms*((W*I(1,3))+(V*((s5*r)-vs5)))-(u1*A2));
ES=us*((W*vi(1,3))-(V*w5));
EQ=(EN1*tan(fi1*pi/180))+(EN2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2);

FS3=((ES*EQ)-(E*((EQ^2)+(B*((ES^2)-(E^2))))^0.5))/((ES^2)-(E^2));
X=sqrt(B+FS3^2);
ex=-((FS3*us*vi(1,1))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,1)*rs)-
((tan(fi2*pi/180))*I(1,1)*ms))/(X));
ey=-((FS3*us*vi(1,2))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,2)*rs)-
((tan(fi2*pi/180))*I(1,2)*ms))/(X));

```

```

ez=-(((FS3*us*vi(1,3))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,3)*rs)-
((tan(fi2*pi/180))*l(1,3)*ms))/(X));
'Dirección de la fuerza externa'
E7=asin(-ez)*180/pi
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
    R7=(atan(ex/ey)*180/pi)
else
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
        R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+180
    else
        if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
            R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+180
        else
            if((atan(ex/ey)*180/pi)+360)>360
                R7=(atan(ex/ey))*180/pi
            else
                R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+360
            end
        end
    end
end
v7=[ex,ey,ez];

se=((v1(1,1)*v7(1,1))+(v1(1,2)*v7(1,2))+(v1(1,3)*v7(1,3)));
vse=((v2(1,1)*v7(1,1))+(v2(1,2)*v7(1,2))+(v2(1,3)*v7(1,3)));
we=((vi(1,1)*v7(1,1))+(vi(1,2)*v7(1,2))+(vi(1,3)*v7(1,3)));

TN1=(rs*((W*K(1,3))+(E*((r*vse)-se))+(V*((vs5*r)-s5)))-(u1*A1);
TN2=(ms*((W*l(1,3))+(E*((r*se)-vse))+(V*((s5*r)-vs5)))-(u1*A2);
TS=us*((W*vi(1,3))-(E*we)-(V*w5));
TQ=(TN1*tan(fi1*pi/180))+(TN2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2);

if TQ/TS>FSR;
'El factor de seguridad sin fuerza de anclaje es mayor al factor de seguridad propuesto'
FS3=TQ/TS
else
    'Fuerza de anclaje necesaria'
    X=(FSR^2 + B)^0.5;
    T3=((FSR*TS)-TQ)/X
    tx=(((FSR*us*vi(1,1))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,1)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*l(1,1)*ms))/(X));
    ty=(((FSR*us*vi(1,2))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,2)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*l(1,2)*ms))/(X));
    tz=(((FSR*us*vi(1,3))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,3)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*l(1,3)*ms))/(X));
    E6=asin(-tz)*180/pi
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
        R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+180
    else
        if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
            R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+360
        else
            if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
                R6=(atan(tx/ty)*180/pi)

```

```

        else
            R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+180
        end
    end
end

'Verificación';

v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180))-sin(E6*pi()/180)];

s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=((v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3)));
w=((vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3)));

N1=(rs*((W*K(1,3))+(E*((r*vse)-se))+(T3*((r*v)-s))+(V*((vs5*r)-s5))))-(u1*A1);
N2=(rs*((W*I(1,3))+(E*((r*se)-vse))+(T3*((r*s)-v))+(V*((s5*r)-vs5))))-(u1*A2);
S=us*((W*vi(1,3))-(E*we)-(T3*w)-(V*w5));
Q=(N1*tan(fi1*pi/180))+(N2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2);
FS3=Q/S
end
else
if N1>0 && N2<0
    'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 1'
    ENa=(W*v1(1,3))-(V*s5)-(u1*A2*r);
    ESx=-((ENa*v1(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
    ESy=-((ENa*v1(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
    ESz=-((ENa*v1(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
    ESa=sqrt((ESx^2)+(ESy^2)+(ESz^2));
    EQa=((ENa-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);
    EFS1=EQa/ESa;

    FS1=((ESa*EQa)-(E*((EQa^2)+(((ESa^2)-(E^2))*(tan(fi1)^2)))^0.5))/((ESa^2)-(E^2));

    'Dirección de la fuerza externa'
    E7=(asin(ESz/ESa)*180/pi)-(atan((tan(fi1*pi/180))/(FS1))*180/pi)
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
        R7=atan(ESx/ESy)*180/pi
    else
        if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
            R7=atan(ESx/ESy)*180/pi+180
        else
            if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
                R7=atan(ESx/ESy)*180/pi+180
            else
                if((atan(ESx/ESy)*180/pi)+360)>360
                    R7=atan(ESx/ESy)*180/pi
                else
                    R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+360
                end
            end
        end
    end
end

```

end

```
v7=[(cos(E7*pi()/180)*sin(R7*pi()/180)),(cos(E7*pi()/180)*cos(R7*pi()/180))-sin(E7*pi()/180)];
```

```
se=((v1(1,1)*v7(1,1))+(v1(1,2)*v7(1,2))+(v1(1,3)*v7(1,3)));
vse=((v2(1,1)*v7(1,1))+(v2(1,2)*v7(1,2))+(v2(1,3)*v7(1,3)));
we=((vi(1,1)*v7(1,1))+(vi(1,2)*v7(1,2))+(vi(1,3)*v7(1,3)));
```

```
TNa=(W*v1(1,3))-(E*se)-(V*s5)-(u1*A2*r);
TSx=-((E*v7(1,1))+(TNa*v1(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
TSy=-((E*v7(1,2))+(TNa*v1(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
TSz=-((E*v7(1,3))+(TNa*v1(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
TSa=sqrt((TSx^2)+(TSy^2)+(TSz^2));
TQa=((TNa-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);
```

```
if TQa/TSa>FSR
```

```
'El factor de seguridad es mayor al factor de seguridad propuesto'
```

```
FS1=TQa/TSa
```

```
else
```

```
'Fuerza de anclaje necesaria'
```

```
T1=((FSR*TSa)-TQa)/sqrt((FSR^2)+(tan(fi1*pi/180))^2)
```

```
E6=atan(((tan(fi1*pi/180))/(FSR))*180/pi)-(asin(TSz/TSa)*180/pi)
```

```
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
```

```
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
```

```
else
```

```
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
```

```
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+360
```

```
else
```

```
if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
```

```
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)
```

```
else
```

```
R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
'Verificación';
```

```
v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180))-sin(E6*pi()/180)];
```

```
s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=((v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3)));
w=((vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3)));
```

```
Na=(W*v1(1,3))-(T1*s)-(E*se)-(V*s5)-(u1*A2*r);
```

```
Sx=-((E*v7(1,1))+(T1*v6(1,1))+(Na*v1(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
```

```
Sy=-((E*v7(1,2))+(T1*v6(1,2))+(Na*v1(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
```

```
Sz=-((E*v7(1,3))+(T1*v6(1,3))+(Na*v1(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
```

```
Sa=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2));
```

```
Qa=((Na-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);
```

```

        end
    else
        'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 2'
        ENb=(W*v2(1,3)-(V*s5)-(u1*A1*r);
        ESx=-((ENb*v2(1,1)+(V*v5(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
        ESy=-((ENb*v2(1,2)+(V*v5(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
        ESz=-((ENb*v2(1,3)+(V*v5(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
        ESB=sqrt((ESx^2)+(ESy^2)+(ESz^2));
        EQb=((ENb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);
        EFS2=EQb/ESB;

        FS2=((ESB*EQb)-(E*((EQb^2)+(((ESB^2)-(E^2))*(tan(fi1)^2)))^0.5))/((ESB^2)-(E^2));

        'Dirección de la fuerza externa'
        E7=(asin(ESz/ESB)*180/pi)-(atan((tan(fi2*pi/180))/(FS2))*180/pi)
        if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
            R7=atan(ESx/ESy)*180/pi
        else
            if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
                R7=atan(ESx/ESy)*180/pi+180
            else
                if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
                    R7=atan(ESx/ESy)*180/pi+180
                else
                    if((atan(ESx/ESy)*180/pi)+360)>360
                        R7=atan(ESx/ESy)*180/pi
                    else
                        R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+360
                    end
                end
            end
        end
    end

    v7=[(cos(E7*pi()/180)*sin(R7*pi()/180)),(cos(E7*pi()/180)*cos(R7*pi()/180)),-(sin(E7*pi()/180))];

    se=(v1(1,1)*v7(1,1)+(v1(1,2)*v7(1,2)+(v1(1,3)*v7(1,3)));
    vse=(v2(1,1)*v7(1,1)+(v2(1,2)*v7(1,2)+(v2(1,3)*v7(1,3)));
    we=(vi(1,1)*v7(1,1)+(vi(1,2)*v7(1,2)+(vi(1,3)*v7(1,3)));

    TNb=(W*v2(1,3)-(E*vse)-(V*vs5)-(u1*A1*r);
    TSx=-((E*v7(1,1))+(TNb*v2(1,1)+(V*v5(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
    TSy=-((E*v7(1,2))+(TNb*v2(1,2)+(V*v5(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
    TSz=-((E*v7(1,3))+(TNb*v2(1,3)+(V*v5(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
    TSb=sqrt((TSx^2)+(TSy^2)+(TSz^2));
    TQb=((TNb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);

    if TQb/TSb>FSR
        'El factor de seguridad es mayor al factor de seguridad propuesto'
        FS2=TQb/TSb
    else
        'Fuerza de anclaje necesaria'
        T2=((FSR*TSb)-TQb)/sqrt((FSR^2)+(tan(fi2*pi/180))^2)
    end

```

```

E6=atan(((tan(fi2*pi/180))/(FSR))*180/pi)-(asin(TSz/TSb)*180/pi)
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
    R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
else
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
        R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+360
    else
        if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
            R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)
        else
            R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
        end
    end
end

'Verificación';

v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180)),
sin(E6*pi()/180)];

s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=((v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3)));
w=((vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3)));

Nb=(W*v2(1,3))-(T2*v)-{E*vse}-(V*vs5)-(u1*A1*r);
Sx=-((E*v7(1,1))+(T2*v6(1,1))+(Nb*v2(1,1))+(V*v5(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
Sy=-((E*v7(1,2))+(T2*v6(1,2))+(Nb*v2(1,2))+(V*v5(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
Sz=-((E*v7(1,3))+(T2*v6(1,3))+(Nb*v2(1,3))+(V*v5(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
Sb=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2));
Qb=((Nb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);
end
end
end
end
else
    'Forma de la cuña o grieta de tensión invalida - Calculo Terminado'
end
else
    if(p*vi(1,3))>0 && ((n*q*vi(1,3))>0)
        ('La cuña cumple con las condiciones de forma y la grifa de tensión igual')
        A1=((m*q*h^2)/(2*abs(p)))
        A2=((abs(q)*(m^2)*(h^2))/(abs(n)))/(2*abs(p))
        W=(gs*((((q^2)*(m^2)*(h^3))/(abs(n))))/(6*abs(p)))
        'Presión de la Grieta de Tensión sobre los planos 1 y 2'
        if Aguia==1
            u1=(gsw*h*abs(m*vi(1,3)))/(6*abs(p));
        else
            u1=0;
        end

        'Reacciones Normales en planos 1 y 2 '
        N1=(rs*(W*K(1,3)))-(u1*A1);
    end
end

```

```

N2=(ms*(W*I(1,3)))-(u1*A2);

'Cálculo del factor de seguridad'
if N1<0 && N2<0
  'FS = 0 , Debido a que se pierde el contacto en ambos planos'
else
  if N1>0 && N2>0
    'El contacto del talud se mantiene sobre ambos planos'
    EN1=(rs*((W*K(1,3)))-(u1*A1));
    EN2=(ms*((W*I(1,3)))-(u1*A2));
    ES=us*((W*vi(1,3)));
    EQ=(EN1*tan(fi1*pi/180))+(EN2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2);

    FS3=((ES*EQ)-(E*((EQ^2)+(B*((ES^2)-(E^2))))^0.5))/((ES^2)-(E^2));
    X=sqrt(B+FS3^2);
    ex=-(((FS3*us*vi(1,1))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,1)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,1)*ms))/(X));
    ey=-(((FS3*us*vi(1,2))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,2)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,2)*ms))/(X));
    ez=-(((FS3*us*vi(1,3))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,3)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*I(1,3)*ms))/(X));
    'Dirección de la fuerza externa'
    E7=asin(-ez)*180/pi
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
      R7=(atan(ex/ey)*180/pi)
    else
      if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
        R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+180
      else
        if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
          R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+180
        else
          if ((atan(ex/ey)*180/pi)+360)>360
            R7=(atan(ex/ey))*180/pi
          else
            R7=(atan(ex/ey)*180/pi)+360
          end
        end
      end
    end
  end
end

v7=[ex,ey,ez];

se=((v1(1,1)*v7(1,1))+(v1(1,2)*v7(1,2))+(v1(1,3)*v7(1,3)));
vse=((v2(1,1)*v7(1,1))+(v2(1,2)*v7(1,2))+(v2(1,3)*v7(1,3)));
we=((vi(1,1)*v7(1,1))+(vi(1,2)*v7(1,2))+(vi(1,3)*v7(1,3)));

TN1=(rs*((W*K(1,3))+(E*((r*vse)-se)))-(u1*A1));
TN2=(ms*((W*I(1,3))+(E*((r*se)-vse)))-(u1*A2));
TS=us*((W*vi(1,3))-(E*we));
TQ=(TN1*tan(fi1*pi/180))+(TN2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2);

if TQ/TS>FSR
  'El factor de seguridad sin fuerza de anclaje es mayor al factor de seguridad propuesto'
  FS3=TQ/TS

```

```

else
'Fuerza de anclaje necesaria'
X=(FSR^2 + B)^0.5;
T3=((FSR*TS)-TQ)/X
tx=(((FSR*us*vi(1,1))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,1)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*l(1,1)*ms))/(X));
ty=(((FSR*us*vi(1,2))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,2)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*l(1,2)*ms))/(X));
tz=(((FSR*us*vi(1,3))-((tan(fi1*pi/180))*K(1,3)*rs)-((tan(fi2*pi/180))*l(1,3)*ms))/(X));
E6=asin(-tz)*180/pi
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
    R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+180
else
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
        R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+360
    else
        if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
            R6=(atan(tx/ty)*180/pi)
        else
            R6=(atan(tx/ty)*180/pi)+180
        end
    end
end
'Verificación';
v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180)),
-sin(E6*pi()/180)];
s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=((v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3)));
w=((vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3)));
N1=(rs*((W*K(1,3))+(E*((r*vse)-se)))+(T3*((r*v)-s)))-(u1*A1);
N2=(rs*((W*l(1,3))+(E*((r*se)-vse)))+(T3*((r*s)-v)))-(u1*A2);
S=us*((W*vi(1,3))-(E*we)-(T3*w));
Q=(N1*tan(fi1*pi/180))+(N2*tan(fi2*pi/180))+(C1*A1)+(C2*A2);
FS3=Q/S;
end
else
if N1>0 && N2<0
'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 1'
ENa=(W*v1(1,3))-(u1*A2*r);
ESx=-((ENa*v1(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
ESy=-((ENa*v1(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
ESz=-((ENa*v1(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
ESa=sqrt((ESx^2)+(ESy^2)+(ESz^2));
EQa=((ENa-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);

FS1=((ESa*EQa)-(E*((EQa^2)+((ESa^2)-(E^2))*(tan(fi1*pi/180)^2)))^0.5))/((ESa^2)-(E^2));
'Dirección de la fuerza externa'
E7=(asin(ESz/ESa)*180/pi)-(atan((tan(fi1*pi/180))/(FS1))*180/pi)
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
    R7=atan(ESx/ESy)*180/pi

```

```

else
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
        R7=atan(ESx/ESy)*180/pi+180
    else
        if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
            R7=atan(ESx/ESy)*180/pi+180
        else
            if((atan(ESx/ESy)*180/pi)+360)>360
                R7=atan(ESx/ESy)*180/pi
            else
                R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+360
            end
        end
    end
end

v7=[(cos(E7*pi/180)*sin(R7*pi/180)),(cos(E7*pi/180)*cos(R7*pi/180)), -sin(E7*pi/180)];

se=((v1(1,1)*v7(1,1))+(v1(1,2)*v7(1,2))+(v1(1,3)*v7(1,3)));
vse=((v2(1,1)*v7(1,1))+(v2(1,2)*v7(1,2))+(v2(1,3)*v7(1,3)));
we=((vi(1,1)*v7(1,1))+(vi(1,2)*v7(1,2))+(vi(1,3)*v7(1,3)));

TNa=(W*v1(1,3))-(E*se)-(u1*A2*r);
TSx=-((E*v7(1,1))+(TNa*v1(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
TSy=-((E*v7(1,2))+(TNa*v1(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
TNa*v1(1,3))+(u1*A2*v2(1,3))+W;
TSA=sqrt((TSx^2)+(TSy^2)+(TSz^2));
TQa=((Na-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);

if TQa/TSA>FSR
    'El factor de seguridad es mayor al factor de seguridad propuesto'
    FS1=TQa/TSA
else
    'Fuerza de anclaje necesaria'
    T1=((FSR*TSA)-TQa)/sqrt((FSR^2)+(tan(fi1*pi/180))^2)
    E6=atan(((tan(fi1*pi/180))/(FSR)*180/pi)-(asin(TSz/TSA)*180/pi)
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
        R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
    else
        if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
            R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+360
        else
            if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
                R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)
            else
                R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
            end
        end
    end
end

'Verificación';

```

```

v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180))-sin(E6*pi()/180)];
```

```

s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=((v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3)));
w=(vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3));
```

```

Na=(W*v1(1,3))-(T1*s)-(E*se)-(u1*A2*r);
Sx=-((E*v7(1,1))+(T1*v6(1,1))+(Na*v1(1,1))+(u1*A2*v2(1,1)));
Sy=-((E*v7(1,2))+(T1*v6(1,2))+(Na*v1(1,2))+(u1*A2*v2(1,2)));
Sz=-((E*v7(1,3))+(T1*v6(1,3))+(Na*v1(1,3))+(u1*A2*v2(1,3)))+W;
Sa=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2));
Qa=((Na-(u1*A1))*tan(fi1*pi/180))+(C1*A1);
end
else
'El contacto del talud solo se mantiene sobre el plano 2'
ENb=(W*v2(1,3))-(u1*A1*r);
ESx=-((ENb*v2(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
ESy=-((ENb*v2(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
ESz=-((ENb*v2(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
ESb=sqrt((ESx^2)+(ESy^2)+(ESz^2));
EQb=((ENb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);
```

```

FS2=((ESb*EQb)-(E*((EQb^2)+(((ESb^2)-(E^2))*(tan(fi2*pi/180))^2)))^0.5)/((ESb^2)-(E^2));
'Dirección de la fuerza externa'
E7=(asin(ESz/ESb)*180/pi)-(atan((tan(fi2*pi/180))/(FS2))*180/pi)
if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
    R7=atan(ESx/ESy)*180/pi
else
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
        R7=atan(ESx/ESy)*180/pi+180
    else
        if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
            R7=atan(ESx/ESy)*180/pi+180
        else
            if((atan(ESx/ESy)*180/pi)+360)>360
                R7=atan(ESx/ESy)*180/pi
            else
                R7=(atan(ESx/ESy)*180/pi)+360
            end
        end
    end
end
end
end
```

```

v7=[(cos(E7*pi/180)*sin(R7*pi/180)),(cos(E7*pi/180)*cos(R7*pi/180))-sin(E7*pi/180)];
```

```

se=((v1(1,1)*v7(1,1))+(v1(1,2)*v7(1,2))+(v1(1,3)*v7(1,3)));
vse=((v2(1,1)*v7(1,1))+(v2(1,2)*v7(1,2))+(v2(1,3)*v7(1,3)));
we=(vi(1,1)*v7(1,1))+(vi(1,2)*v7(1,2))+(vi(1,3)*v7(1,3));
```

```

TNb=(W*v2(1,3))-(E*vse)-(u1*A1*r);
TSx=-((E*v7(1,1))+(TNb*v2(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
```

```

TSy=-((E*v7(1,2))+(TNb*v2(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
TSz=-((E*v7(1,3))+(TNb*v2(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
TSb=sqrt((TSx^2)+(TSy^2)+(TSz^2));
TQb=((TNb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);

if TQb/TSb>FSR
    'El factor de seguridad es mayor al factor de seguridad propuesto'
    FS2=TQb/TSb
else
    'Fuerza de anclaje necesaria'
    T2=((FSR*TSb)-TQb)/sqrt((FSR^2)+(tan(fi2*pi/180))^2)
    E6=atan(((tan(fi2*pi/180))/(FSR))*180/pi)-(asin(TSz/TSb)*180/pi)
    if vi(1,1)<0 && vi(1,2)<0
        R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
    else
        if vi(1,1)<0 && vi(1,2)>0
            R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+360
        else
            if vi(1,1)>0 && vi(1,2)>0
                R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)
            else
                R6=(atan(TSx/TSy)*180/pi)+180
            end
        end
    end
end

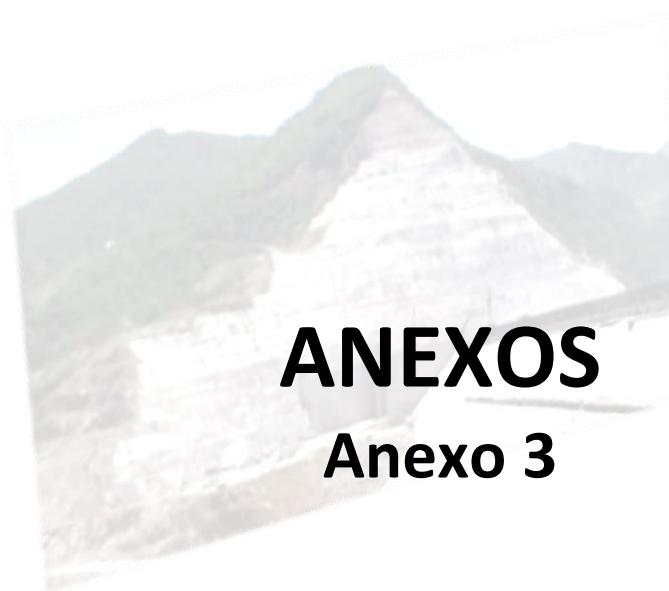
'Verificación';

v6=[(cos(E6*pi()/180)*sin(R6*pi()/180)),(cos(E6*pi()/180)*cos(R6*pi()/180))-sin(E6*pi()/180)];

s=((v1(1,1)*v6(1,1))+(v1(1,2)*v6(1,2))+(v1(1,3)*v6(1,3)));
v=((v2(1,1)*v6(1,1))+(v2(1,2)*v6(1,2))+(v2(1,3)*v6(1,3)));
w=((vi(1,1)*v6(1,1))+(vi(1,2)*v6(1,2))+(vi(1,3)*v6(1,3)));

Nb=(W*v2(1,3))-(T2*v)-(E*vse)-(u1*A1*r);
Sx=-((E*v7(1,1))+(T2*v6(1,1))+(Nb*v2(1,1))+(u1*A1*v1(1,1)));
Sy=-((E*v7(1,2))+(T2*v6(1,2))+(Nb*v2(1,2))+(u1*A1*v1(1,2)));
Sz=-((E*v7(1,3))+(T2*v6(1,3))+(Nb*v2(1,3))+(u1*A1*v1(1,3)))+W;
Sb=sqrt((Sx^2)+(Sy^2)+(Sz^2));
Qb=((Nb-(u1*A2))*tan(fi2*pi/180))+(C2*A2);
end
end
end
end
else
    'Forma de la cuña es invalida - Calculo Terminado'
end
end
end
end

```



ANEXOS

Anexo 3

2	
Zona de Falla Vertedor	
1 Rc =20 Mpa	2
2 RQD 11 %	2
3 Separación de Diaclasas(<600 mm)	5
4 Estado de Discontinuidades	
Longitud (3 a 10 m)	2
Abertura (>5 mm)	0
Rugosidad(ligeramente rugosa)	3
Relleno (blando>5mm)	0
Alteración (muy alterada)	1
	6
5 Húmedo	7
Corrección(Media)	-7
RMR 15	
GSI 10	

3	
Zona de Dique	
1 Rc = 5 MPa	1
2 RQD = <21 %	2
3 Separación de Diaclasas(<600 mm)	5
4 Estado de Discontinuidades	
Longitud(3 a 10)	2
Abertura (>5 mm)	0
Rugosidad (ondulada)	1
Relleno(Blando>5mm)	0
Alteración(muy alterada)	1
	4
5 Húmedo	7
Corrección(Media)	-7
RMR 12	
GSI 7	

4	
Toba Vítrea	
1 Rc = 25 MPa	3
2 RQD < 6 %	3
3 Separación de Diaclasas (200-600mm)	10
4 Estado de Discontinuidades	
Longitud(3 a 10)	2
Abertura(1 a 5mm)	1
Rugosidad(ligeramente rugosa)	3
Relleno(Duro>5mm)	2
Alteración (moderada)	3
	11
5 Goteando	4
Corrección(Media)	-7
RMR 24	
GSI 19	

5	
Dacita Decomprimida	
1 Rc = 50 MPa	4
2 RQD = 25-50 %	6
3 Separación de Diaclasas (200-600mm)	10
4 Estado de Discontinuidades	
Longitud(3 a 10)	2
Abertura(1 a 5mm)	1
Rugosidad(ligeramente rugosa)	3
Relleno(Duro>5mm)	2
Alteración (moderada)	3
	11
5 Seco	15
Corrección(Media)	-7
RMR 39	
GSI 34	

6	
Rilita Brechoide Decomprimida	
1 Rc = 50 MPa	4
2 RQD = 25-50 %	6
3 Separación de Diaclasas (200-600mm)	10
4 Estado de Discontinuidades	
Longitud(3 a 10)	2
Abertura(1 a 5mm)	1
Rugosidad (ligeramente rugosa)	3
Relleno (duro>5mm)	2
Alteración (moderada)	3
	11
5 Húmedo	7
Corrección(Media)	-7
RMR 31	
GSI 26	

7	
Dacita Porfídica 2,7 km/s	
1 Rc = 90 MPa	5
2 RQD = 50-75 %	13
3 Separación de Diaclasas (300-1000mm)	13
4 Estado de Discontinuidades	
Longitud(3 a 10)	2
Abertura(1 a 5mm)	1
Rugosidad (ligeramente rugosa)	3
Relleno (duro<5mm)	4
Alteración (inalterada)	6
	16
5 Seco	15
Corrección(Media)	-7
RMR 55	
GSI 50	

8	
Dacita Porfídica 3,8 km/s	
1 Rc = 90 MPa	7
2 RQD 75-90 %	17
3 Separación de Diaclasas (300-1000mm)	13
4 Estado de Discontinuidades	
Longitud (10a 20 m)	1
Abertura(1 a 5mm)	1
Rugosidad(muy Rugosa)	6
Relleno (duro<5mm)	4
Alteración (inalterada)	6
	18
5 Húmedo	15
Corrección(Media)	-7
RMR 63	
GSI 58	

9	
Dacita Fluidal 3,3 Km/s	
1 Rc = 132 MPa	11
2 RQD = 50-75 %	13
3 Separación de Diaclasas (300-1000mm)	15
4 Estado de Discontinuidades	
Longitud (10a 20 m)	1
Abertura(1 a 5mm)	1
Rugosidad(muy Rugosa)	6
Relleno (duro<5mm)	4
Alteración (inalterada)	6
	18
5 Seco	15
Corrección(Media)	-7
RMR 65	
GSI 60	

10	
Dacita-Riolita Brechoide Muy Fracturada 1,7 km/s	
1 Rc = 30 MPa	3
2 RQD < 25 %	3
3 Separación de Diaclasas (60 a 200 mm)	7
4 Estado de Discontinuidades	
Longitud (10a 20 m)	1
Abertura >5 mm	0
Rugosidad (ligeramente rugosa)	3
Relleno(Blando<5mm)	2
Alteración (moderada)	3
	9
5 Húmedo	7
Corrección(Media)	-7
RMR 22	
GSI 17	

11	
Rilita Brechoide Fracturada 2,5 km/s	
1 Rc = 70 MPa	7
2 RQD = 50-75 %	12
3 Separación de Diaclasas (300-1000mm)	13
4 Estado de Discontinuidades	
Longitud(3 a 10)	2
Abertura(1 a 5mm)	1
Rugosidad (ligeramente rugosa)	3
Relleno (duro<5mm)	4
Alteración (inalterada)	6
	16
5 Ligeramente Húmedo	10
Corrección(Media)	-7
RMR 51	
GSI 46	