



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TITULO DE INGENIERO CIVIL

**Análisis comparativo de las metodologías de cálculo de estabilidad de
taludes**

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTORA: Curipoma Viteri, Andrea Esthefanía

DIRECTORA: Esparza Villalba, Carmen Antonieta, MSc

LOJA – ECUADOR

2017



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2017

APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ingeniera, MSc.

Carmen Antonieta Esparza Villalba.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: Análisis comparativo de las metodologías de cálculo de estabilidad de taludes realizado por Andrea Esthefanía Curipoma Viteri ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, septiembre de 2017

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo Andrea Esthefanía Curipoma Viteri declaro ser autora del presente trabajo de titulación: Análisis comparativo de las metodologías de cálculo de estabilidad de taludes, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo Carmen Antonieta Esparza Villalba directora del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad.

f)

Autor: Andrea Esthefanía Curipoma Viteri

Cédula: 1105107153

DEDICATORIA

A Dios por sus incontables bendiciones en mi caminar, a la Virgen María por su infinito amor de madre y a mis padres por ser fieles compañeros en cada meta propuesta.

Con amor, Tefi.

AGRADECIMIENTO

Tras la culminación de este proyecto extendo mi profundo agradecimiento:

A Dios por regalarme la vida, una familia maravillosa y la oportunidad de cursar una carrera universitaria.

A la Virgen María por ser madre amorosa intercesora ante el Padre y principal soporte espiritual.

A mis padres por su amor, trabajo y sacrificio en formar la persona que hoy soy; por el arduo esfuerzo económico que significó brindarme la oportunidad de estudiar y por siempre motivarme a luchar por mis sueños con firmeza, perseverancia y optimismo.

A la Ing. MSc. Carmen Esparza por su paciencia, consejos y guía constante durante el desarrollo del trabajo.

A mis hermanos y familiares por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A todos los amigos y compañeros que me han extendido su cariño a través de palabras de aliento para no desfallecer en los momentos más difíciles de mi vida universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I.....	5
(MARCO CONCEPTUAL).....	5
1.1. Estabilidad de taludes.....	6
1.2. Cálculo de estabilidad.....	10
1.3.1. Talud infinito.	12
1.3.2. Método de cuñas.	13
1.3.3. Ábacos de Taylor: Método de masa total.....	14
1.3.4. Ábacos de Hoek y Bray.	14
1.3.5. Ábacos de Janbú.....	15
1.3.6. Método Ordinario o de Fellenius.	15
1.3.7. Método de Bishop Simplificado.....	16
1.3.8. Método de Janbú simplificado.	17
1.3.9. Método de Spencer.	18
1.3.10. Método de Bishop Riguroso.....	19
1.3.11. Método de Morgenstern – Price.....	19
CAPÍTULO II.....	21
(MARCO METODOLÓGICO).....	21
2.1. Generalidades.	22
2.2. Delimitación de zonas de estudio.	22

2.3. Recolección de información de campo y laboratorio.	23
2.4. Planteamiento de ejercicios tipo.	24
2.5. Análisis de estabilidad.	26
CAPÍTULO III.....	31
(RESULTADOS Y DISCUSIÓN)	31
3.1. Resultados análisis de estabilidad.	32
3.1.1. Ejercicio 1.....	32
3.1.2. Ejercicio 2.....	36
3.1.3. Resumen de resultados.....	37
3.2. Análisis comparativo de metodologías.....	38
CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	48
ANEXOS.....	52
Anexo A. Ábacos métodos de cálculo de estabilidad de taludes	53
Anexo A.1. Ábacos de talud infinito.....	53
Anexo A.2. Ábacos de Taylor.....	54
Anexo A.3. Ábacos de Hoek y Bray	56
Anexo B. Ejercicios planteados	61
Anexo C. Superficies de falla críticos	67
Anexo D. Cálculos métodos de dovelas.	73
Anexo D.1. Cálculos de ejercicio 1.	73
Anexo D.2. Cálculos de ejercicio 2.	77
Anexo D.3. Cálculos de ejercicio 3.	81
Anexo D.4. Cálculos de ejercicio 4.	85
Anexo D.5. Cálculos de ejercicio 5.	89
Anexo E. Modelaciones Método de Elementos Finitos (FEM)	93
Anexo F. Comparativa de hipótesis de diferentes métodos de cálculo de estabilidad.	98

RESUMEN

Las metodologías disponibles para el cálculo del factor de seguridad (FS) de un talud incorporan diversas hipótesis en su formulación matemática; como consecuencia la selección del método adecuado que represente los escenarios evaluados aún es incierto. Ante ello, el presente trabajo de fin de titulación tuvo por objetivo realizar un análisis comparativo de los diferentes métodos de cálculo de estabilidad de taludes para determinar la influencia de los parámetros considerados.

La investigación comprendió la caracterización geomecánica de taludes seleccionados, planteamiento de ejercicios tipo y el cálculo de su factor de seguridad por métodos de equilibrio límite (ábacos y dovelas) y metodologías tensodeformacionales (elementos finitos). Los resultados mostraron que la dispersión de los FS calculados por las diferentes metodologías está principalmente asociado a las características de resistencia al corte de los estratos que conforman el talud, presencia de nivel freático y tipo de falla suscitado.

PALABRAS CLAVE: estabilidad de taludes, factor de seguridad, métodos de cálculo, equilibrio límite, elementos finitos, resistencia al corte, tipo de falla.

ABSTRACT

The available methodologies for the safety factor (SF) calculation of a slope incorporate hypothesis in their mathematical formulation; as a consequence the appropriate method selection that better represent the evaluated scenarios is still uncertain. The objective of this work was to perform a comparative analysis of the different methods slope stability calculation in order to determine the influence of parameters considered.

The investigation included the geomechanical characterization of slopes selected and the safety factor calculation by limit equilibrium methods (abacuses and slices) and tenso-deformational methodologies (finite elements). It was found that SF dispersion calculated by the different methodologies is mainly associated with the shear strength characteristics of the slope layers, the presence of groundwater and the type of failure given.

KEY WORDS: slope stability, safety factor, calculation methods, limit equilibrium, finite elements, shear strength, type of failure.

INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de taludes, reflejada en derrumbes, deslizamientos, flujos, entre otros, es un problema complejo y recurrente catalogado como uno de los peligros naturales más amenazantes para la vida y bienes de la población (Alcántara, Echavarría, Gutiérrez, Domínguez, y Noriega, 2001); dichos fenómenos se originan cuando se altera las condiciones de resistencia al corte del suelo o roca, ya sea por factores externos como la intervención humana o por factores internos consecuentes a la dinámica evolutiva del material (Gerscovich, 2015).

El avance y desarrollo de la sociedad exige la construcción de nuevos proyectos, vías, expansión de ciudades, entre otros, que generalmente inciden en el requerimiento de analizar la estabilidad de taludes para resguardar la seguridad e implementar, de ser necesario, medidas correctivas.

Desde 1930, se ha utilizado el enfoque de equilibrio límite (LEM) en el análisis de taludes. En un principio se plantearon metodologías mediante tablas y ábacos como Taylor (1948); luego con el desarrollo computacional se propuso métodos que requieren cálculos extensos o iteraciones como Fellenius (1927), Bishop (1955), Janbú (1968), Morgenstern-Prince (1965), Spencer (1967), entre otros; y actualmente se encuentra en auge el uso de software a través de modelaciones con métodos numéricos (FEM) en 2D y 3D.

Pese a la evolución metodológica de los análisis de estabilidad reflejada en normativas, guías, manuales y textos, la selección del método adecuado en la evaluación de taludes es aún incierta. Los ingenieros con menos experiencia en el área habitualmente recurren al uso desmedido de métodos tradicionales por su relativa facilidad de manejo sin considerar que sus hipótesis de formulación pueden no representar los escenarios evaluados. Duncan (1996), recalca que el ingeniero a cargo del proyecto debe tener un dominio completo de mecánica de suelos y geotecnia, así como capacidad y dedicación para evaluar los resultados evitando medidas equívocas.

Por lo anteriormente expuesto, el presente trabajo de fin de titulación tiene como objetivo general realizar un análisis comparativo de los diferentes métodos de cálculo de estabilidad de taludes determinando la influencia de sus hipótesis y parámetros requeridos. Los objetivos específicos planteados para alcanzar dicha propuesta son: 1) clarificar la fundamentación teórica considerada en el análisis de estabilidad ligado a los mecanismos de falla supuestos y 2) analizar los diversos procedimientos que conlleven a obtener los factores de seguridad.

La metodología a emplear es cuantitativa no experimental; inicia con la recopilación bibliográfica necesaria y la posterior recolección de información de campo y laboratorio en las

zonas de estudio seleccionadas; luego se procede al planteamiento de ejercicios tipo y elaboración de hojas de cálculo del factor de seguridad (FS) de los métodos elegidos. A continuación se realiza la modelación de los taludes en dos software de estabilidad: Slide v.5.0 y Phase2 (versiones de prueba de libre acceso). Finalmente se analiza los resultados obtenidos estableciendo las conclusiones y recomendaciones requeridas que cumplan con los objetivos inicialmente planteados.

En el capítulo I se desarrolla el marco conceptual que fundamenta el proyecto introduciendo al lector en la comprensión de los conceptos básicos sobre taludes y describe las principales características e hipótesis de los diferentes métodos de cálculo de estabilidad; a continuación en el capítulo II se desglosa la metodología seguida en el planteamiento y resolución de ejercicios tipo; luego en el capítulo III se presenta el resumen y análisis comparativo de los resultados obtenidos y finalmente en el último apartado se expone las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I
(MARCO CONCEPTUAL)

1.1. Estabilidad de taludes.

En las construcciones civiles, específicamente en proyectos de tipo lineal, la superficie del terreno comúnmente se expone a pendientes con respecto a la horizontal denominadas taludes o pendientes restringidas los cuales pueden ser naturales (laderas) o artificiales (cortes y terraplenes).

La estabilidad de un talud está determinada por diversos factores los cuales se clasifican en 1) factores condicionantes, que son intrínsecos de los materiales naturales del suelo o roca provocando movimientos de variación lenta, y 2) factores desencadenantes que aceleran o retardan la ocurrencia de fallas dando lugar a movimientos de variación rápida. En la tabla 1 se resume estos factores.

Tabla 1. Factores que afectan la estabilidad de taludes

FACTORES CONDICIONANTES	
Estratigrafía y litología	Representa la naturaleza (propiedades físicas y resistentes) del material constituyente del talud que condicionan las tensiones y deformaciones.
Estructura geológica y discontinuidades	En macizos rocosos se analiza el tipo de roca, grado de alteración y presencia de planos de debilidad. Si el buzamiento de diaclasas, estratificaciones, fallas, etc. es cercano al buzamiento del talud implica planos de rotura potenciales.
Hidrogeología	La presencia de presiones intersticiales por presencia de agua disminuye la resistencia cortante del terreno; si hay grietas de tensión genera presiones de poros transitorias que afectan la estabilidad del talud.
Propiedades geomecánicas	Los parámetros resistentes primordiales son cohesión y rozamiento interno. En macizos rocosos, las propiedades resistentes de discontinuidades y de la matriz rocosa controlan el comportamiento mecánico.
Relieve - vegetación	El efecto gravitacional aumenta proporcionalmente con la altura y pendiente. Además la falta de raíces acelera la erosión superficial.
FACTORES DESENCADENANTES	
Sobrecargas estáticas y cargas dinámicas	Modifican la distribución de las fuerzas generando condiciones de inestabilidad.
Factores climáticos	La alternancia de periodos de sequía y lluvia produce cambios en la estructura de los suelos ocasionando pérdidas de resistencia al corte, mientras que en macizos rocosos la acción de hielo y deshielo provoca apertura de discontinuidades e infiltración en fisuras y grietas.

Continúa Tabla 1

FACTORES DESENCADENANTES	
Terremotos - vulcanismo	Las vibraciones sísmicas modifican el estado de esfuerzos en el interior de la tierra; mientras que las erupciones volcánicas originan deslizamientos, avalanchas o el deshielo de partes altas que dan lugar a flujos rápidos.
Erosión y socavación	La meteorización da lugar a degradación y alteración de materiales, mientras que la socavación en el pie de laderas cambia el estado tensional reduciendo las propiedades resistentes del talud por variaciones en la geometría del talud.

Fuente: González y León, 2013; González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, y Oteo, 2002.

Elaboración: La autora

La interfaz entre la masa de suelo o roca potencialmente inestable y la masa de terreno estable del talud se conoce como superficie de falla o rotura; su tipología depende principalmente del ángulo de inclinación del talud y de las propiedades de resistencia al corte de los materiales (cohesión y ángulo de fricción). La geometría de dichas superficies es variable pero se puede considerar que en deslizamientos rotacionales son superficies curvilíneas y cóncavas, mientras que en deslizamientos traslacionales son planas y onduladas (González y León, 2013).

Tipos de rotura.

Los diferentes tipos de rotura de taludes están condicionados por las características intrínsecas de sus materiales constituyentes.

Taludes en suelo.

La geometría de las superficies de falla de taludes en suelo generalmente es curva; roturas a favor de un único plano paralelo al talud (figura 1b) es válido en laderas naturales con recubrimientos de suelos sobre rocas (González de Vallejo et al., 2002). La denominación de fallas aproximadamente circulares según Braja (2001) se detalla a continuación:

- Falla de talud por círculo de pie: el extremo inferior de la superficie de rotura interseca al talud en el pie (figura 1a), se presenta en terrenos homogéneos o formados de diversos estratos con propiedades geotécnicas homogéneas.
- Falla de talud por círculo de talud: el extremo inferior de la superficie de rotura interseca al talud arriba del pie (figura 1d), también se la conoce como falla superficial.
- Falla de base por círculo de medio punto: la superficie de rotura pasa debajo del pie del talud (figura 1c) generalmente tangente a un estrato firme.

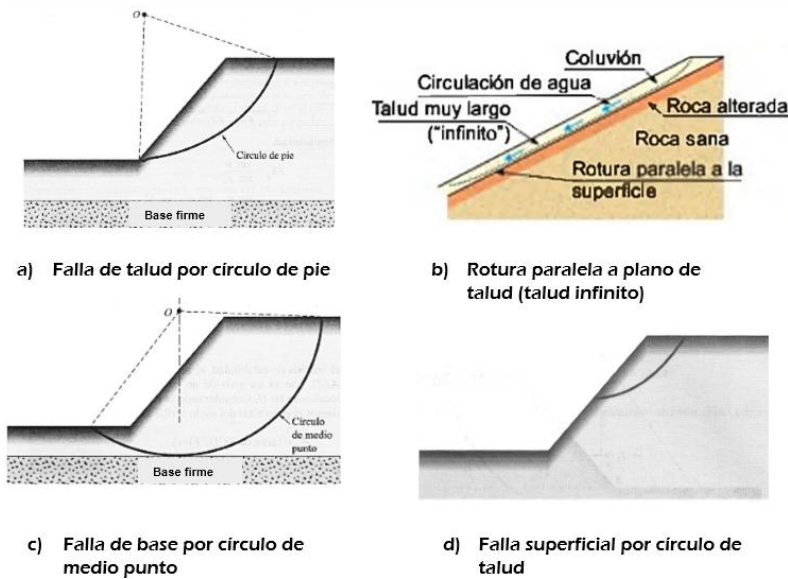


Figura 1: Tipos de rotura en taludes de suelo
 Fuente: Braja M, 2001 y González de Vallejo et al., 2002
 Elaboración: La autora

Taludes en roca.

La geometría de roturas en macizos rocosos, a excepción de rocas sanas no fracturadas, se considera como un ensamblaje de bloques de roca intacta condicionados por: su grado de fracturación, juntas, foliaciones, discontinuidades de la roca, orientación y distribución de estratificaciones. Los tipos de falla se identifican a través de un análisis cinemático como se muestra en la figura 2.

La falla planar es controlada por una sola discontinuidad principal y ocurre a lo largo de una superficie aproximadamente plana preexistente (estratificación, junta tectónica, etc.). Suárez Díaz (1998) menciona que se puede evaluar por el método de equilibrio límite si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) La dirección de la discontinuidad principal debe estar a menos de 20 grados de la dirección de la superficie del talud.
- b) El buzamiento de la discontinuidad debe ser menor que el buzamiento de la superficie del talud.
- c) El buzamiento de la discontinuidad debe ser mayor que su ángulo de fricción promedio.

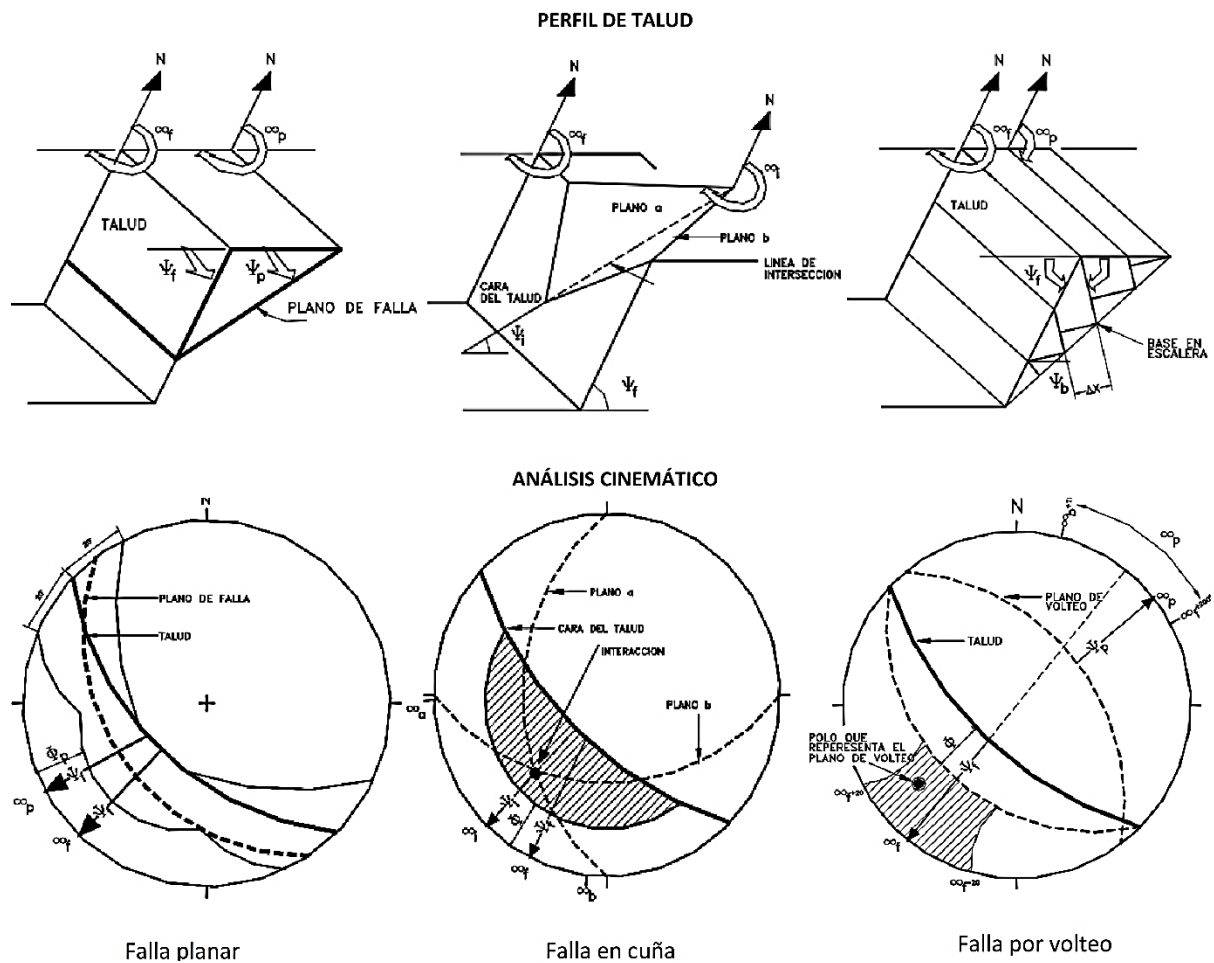


Figura 2: Tipos de falla en taludes de roca

Fuente: (Suárez Díaz, 1998).

Elaboración: La autora

González de Vallejo et al. (2002) definen a la falla en cuña como aquella controlada por dos discontinuidades; ocurre cuando un bloque en forma de cuña se desliza a favor de la línea de intersección de dos planos de discontinuidades que afloran en la superficie del talud. Según el análisis cinemático esta falla se da si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) La dirección de la línea de intersección debe ser aproximadamente cercana a la del buzamiento de la superficie del talud.
- b) El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el de la superficie del talud.
- c) El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción promedio de las dos superficies. (Suárez Díaz, 1998).

La falla por volteo o vuelco en estratos involucra columnas de roca definidas por grandes discontinuidades e implica un movimiento de rotación de los bloques; se produce cuando el buzamiento de los estratos es contrario a la inclinación del talud y con dirección paralela al mismo (González de Vallejo et al., 2002). Según el análisis cinemático esta falla se da si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) El rumbo de las capas debe ser aproximadamente paralelo a la superficie del talud, con una diferencia no superior a 20 grados.
- b) El buzamiento debe cumplir la siguiente condición: $(90^\circ - \Psi_p) < (\Psi_f - \varphi_p)$; donde Ψ_p es el buzamiento de las capas, Ψ_f es el buzamiento de la superficie del talud y φ_p es el ángulo de fricción a lo largo de los planos (Suárez Díaz, 1998).

1.2. Cálculo de estabilidad.

El grado de estabilidad de un talud principalmente se cuantifica con el cálculo del factor de seguridad que refleja la amenaza de falla bajo condiciones críticas; para ello se debe conocer: las propiedades geológicas y geomecánicas de los materiales constitutivos del talud, los posibles modelos de rotura y los factores externos que condicionan y desencadenan inestabilidades. Los resultados del análisis permiten, en caso de ser necesario, definir las medidas correctivas o estabilizadoras más adecuadas (González de Vallejo et al., 2002).

El factor de seguridad (FS) se puede definir como la relación entre las propiedades de resistencia al corte del material del talud en estudio y los esfuerzos de corte más desfavorables que podrían producir rotura a lo largo de una superficie supuesta de falla. Se asume que este valor es igual en todos los puntos donde un FS igual a 1 significa equilibrio (Suárez Díaz, 1998). Considerando el riesgo, importancia de las obras proyectadas y la confiabilidad de los datos geotécnicos recopilados, el coeficiente de seguridad óptimo es más o menos permisivo; González de Vallejo et al. (2002) recomienda adoptar como FS mínimo 1.5 o 2 en taludes permanentes y 1.3 en taludes temporales.

1.2.1. Clasificación de los métodos de análisis.

Todos los métodos de análisis se basan en un planteamiento físico-matemático que debería satisfacer 15 ecuaciones con 15 incógnitas: las ecuaciones de equilibrio tensional (equilibrio de fuerzas horizontales, verticales y momentos), las ecuaciones de compatibilidad entre deformaciones - desplazamientos y las relaciones tensión-deformación-resistencia de los materiales constituyentes del talud (Ortuño Abad, Uriel y Asociados, y Prof. Asociado. ETSICCP, 2004).

El Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1986) estableció la clasificación de los métodos de cálculo en dos grupos: 1) métodos tensodeformacionales, que consideran análisis estático y las tensiones - deformaciones del talud y 2) métodos de equilibrio límite que únicamente se basan en las leyes de la estática suponiendo que la resistencia al cortante es igual en toda la superficie de rotura. El análisis con métodos de equilibrio límite se puede realizar con diferente grado de exactitud evaluando la masa inestable como un único bloque en toda su longitud (métodos exactos) o imponiéndose condiciones iniciales para su resolución (métodos no exactos).

Los métodos exactos son aplicables a materiales homogéneos donde las leyes de la estática dan una solución exacta de la estabilidad del talud por su geometría sencilla como por ejemplo rotura planar o de cuña; en cambio para la resolución de métodos no exactos, se requieren simplificaciones o hipótesis iniciales pues las ecuaciones estáticas son insuficientes. Dentro de los métodos no exactos se pueden distinguir los métodos de estabilidad global (consideran como un todo la rotura del suelo) y los métodos de dovelas (dividen la masa deslizante en franjas verticales) (IGME, 1986).

Existe una última sub-clasificación de los métodos de dovelas: métodos aproximados, no cumplen todas las leyes de la estática como Fellenius, Janbú y Bishop simplificado, y métodos precisos, cumplen todas las ecuaciones de la estática como Morgenstern-Price, Spencer y Bishop riguroso (IGME, 1986). La clasificación de los métodos se puede visualizar de mejor manera en la figura 3.

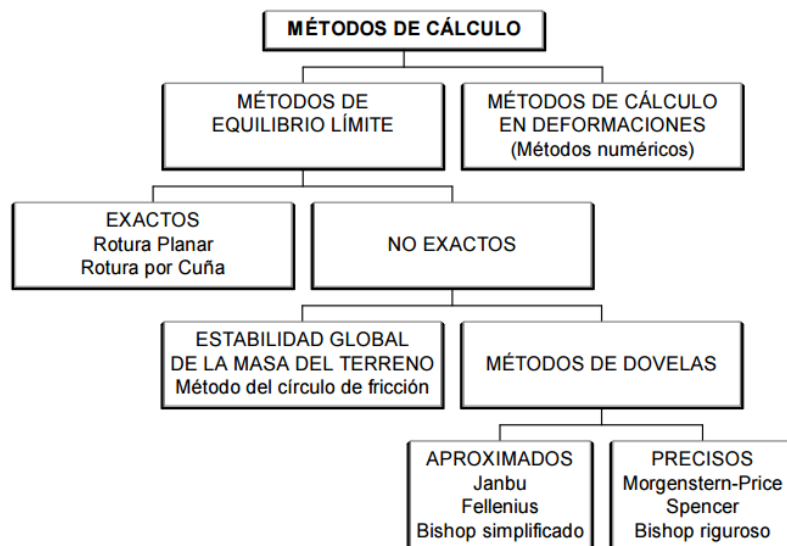


Figura 3: Clasificación de métodos de cálculo de estabilidad de taludes
Fuente: IGME, 1986
Elaboración: La autora

1.3. Métodos de análisis de equilibrio límite.

Una de las características principales de los métodos de análisis de equilibrio límite (MEL o LEM) es la definición a priori de una superficie potencial de falla bajo el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y la definición del coeficiente de seguridad. Son métodos estáticamente indeterminados que requieren: geometría de superficie de falla coherente al deslizamiento, fuerzas actuantes acorde a las características intrínsecas del suelo o roca y simultaneidad de los parámetros a lo largo del plano de rotura (González de Vallejo et al., 2002).

Considerando que no todos los factores que inestabilizan un talud son cuantificables, los métodos de análisis varían por las consideraciones iniciales del tipo de superficie de falla y la

aplicación de fuerzas sobre ella. Suárez Díaz (2009) menciona las siguientes limitantes de los métodos LEM:

- Asume al material como isotrópico y muchas veces las distribuciones de presiones y esfuerzos no son realistas (no representan todo el terreno).
- Se fundamentan sólo en la estática con modelos de falla muy sencillos para materiales no isotrópicos que dan lugar a fallas no simétricas con deformaciones progresivas. Además si la distribución de esfuerzos y deformaciones es influyente se debe considerar métodos tensodeformacionales.
- El factor de seguridad se considera constante pero según estudios de Wright (1973) y Tavenas (1980) no es igual en todos los puntos de la superficie de falla.

1.3.1. Talud infinito.

La rotura es traslacional con una línea de falla paralela a la superficie de talud (figura 4) lo suficientemente extensa comparada con su espesor como para desprestigiar los efectos de borde; cualquier faja de suelo representa a todo el talud pues supone suelo isotrópico y homogéneo (Suárez Díaz, 1998). El método del talud infinito cumple directamente con el equilibrio de fuerzas e indirectamente con el equilibrio de momentos al considerar las fuerzas como no lineales y la fuerza normal actuando en el centro del bloque de suelo analizado (Duncan, Wright y Brandon, 2014).

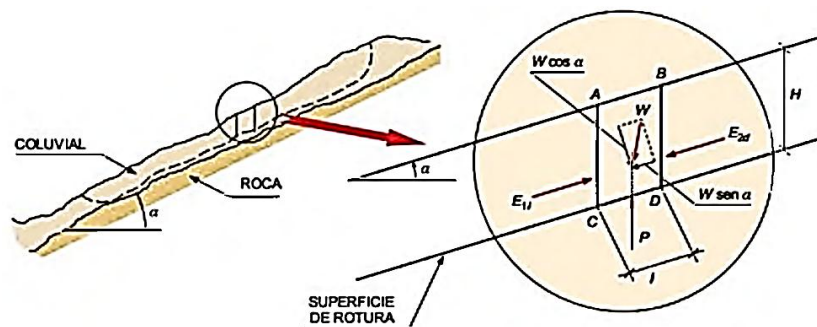


Figura 4: Método de talud infinito
 Fuente: (González de Vallejo et al., 2002).
 Elaboración: (González de Vallejo et al., 2002).

Diversos autores como Cornforth (2005) y la IGME (1986) aseguran que el factor de seguridad (FS) en terrenos cohesivos saturados es aproximadamente la mitad del FS del talud seco, en terrenos cohesivos es inversamente proporcional a la profundidad H de la superficie de deslizamiento y si el talud es sumergido en terrenos no cohesivos FS es igual al calculado para un talud seco. La ecuación principal del método se muestra a continuación:

Ecuación general

$$FS = \frac{c' + \left[(\gamma * H * \cos^2 \beta - u) * \tan \phi' \right]}{\gamma * H * \sin \beta * \cos \beta} \quad (1)$$

Dónde: H = altura de masa deslizante
 c' = cohesión efectiva
 γ = peso específico
 β = ángulo de inclinación con la horizontal de la superficie de rotura
 ϕ' = ángulo de fricción efectivo
 u = presión intersticial del agua ($u = \gamma_w \cdot h_w$)

Debido a la sencillez del método se ha desarrollado un conjunto de ábacos que se basan en la determinación de dos números de estabilidad, A y B, y la resolución de la ecuación 2 (Ortuño Abad et al., 2014). Los ábacos se adjuntan en el anexo A.1.

$$FS = A \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + B \frac{c'}{\gamma^* H} \quad (2)$$

1.3.2. Método de cuñas.

Cuando en un talud existe material relativamente delgado de forma poligonal sobre un estrato duro que propicie el deslizamiento, se puede considerar la superficie de rotura como una, dos o tres cuñas (bloques de material) apoyadas contiguamente y analizar el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales sobre cada una de ellas. González de Vallejo et al. (2002) expone la siguiente metodología de cálculo:

- 1) Dividir mediante líneas verticales una superficie supuesta de falla en máximo tres cuñas deseadas de manera que los tramos rectos afecten sólo a un tipo de estrato.
- 2) Calcular el peso de la cuña e imponerse un coeficiente de seguridad FS.
- 3) Determinar el polígono de fuerzas actuantes y establecer el equilibrio hasta llegar al último bloque corroborando con los valores de cohesión y fricción movilizados.
- 4) El coeficiente de seguridad es el indicado si se cumple el equilibrio, caso contrario volver a realizar el proceso hasta que se cumpla FS.

Suárez Díaz (1998) propone para el caso de dos o tres cuñas analizar el equilibrio utilizando la teoría de presión de tierra de Rankine o Coulomb a través de la ecuación 3. Si el plano de rotura se adapta a Mohr-Coulomb el método es aplicable a taludes de presas de tierras, terraplenes en suelos blandos, etc. Para mayor detalle se recomienda remitir a Marín Rodríguez y Quintero Díaz (2008).

$$FS = \frac{Pp + c'_m L + (W - u) \tan \phi'_m}{Pa} \quad (3)$$

Dónde: Pp = fuerza pasiva producida por la cuña inferior
 C'_m = cohesión efectiva del suelo blando en la base del bloque central

P_a = fuerza activa producida por la cuña superior

L = longitud del fondo del bloque central

ϕ'_m = ángulo de fricción efectivo en el fondo del bloque

u = presión intersticial del agua en el fondo del bloque central ($u = \gamma_w \cdot h_w$)

W = peso total del bloque central

1.3.3. Ábacos de Taylor: Método de masa total.

La superficie de falla considerada es circular en terrenos isótropos cohesivos saturados ($\phi=0$) con la existencia de un estrato rígido profundo que limita los círculos de rotura; los cálculos se efectúan con parámetros totales exclusivo de análisis a corto plazo, aunque si el talud está totalmente seco o drenado, Suárez Díaz (2009) afirma que se puede analizar a corto plazo bajo esfuerzos efectivos.

El método se basa en el criterio de falla de Mohr-Coulomb suponiendo tensiones normales a la superficie de rotura concentradas en un solo punto con el cumplimiento de equilibrio de momentos (González de Vallejo et al., 2002). Analiza la superficie de deslizamiento como un solo bloque a través del cálculo del número de estabilidad (N_o) que depende del buzamiento del talud y el factor de profundidad al estrato resistente mediante diversos tanteos gráficos o analíticos en una serie de ábacos desarrollados experimentalmente (ver anexo A.2).

Gerscovich (2012) menciona que en suelos heterogéneos se puede sustituir los parámetros geotécnicos por un suelo equivalente a través de una media ponderada en función de la potencia de los estratos como se indica en la figura 5, mientras que González de Vallejo et al. (2002) expone que en caso de existir nivel freático horizontal a mitad de talud puede usarse el peso específico medio del terreno.

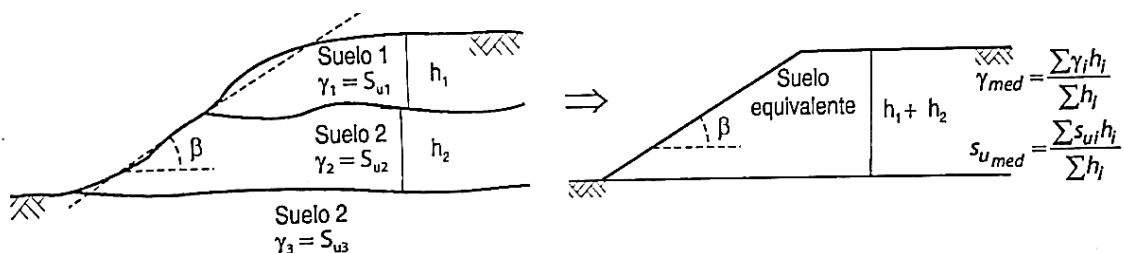


Figura 5: Ejemplo ponderación características geomecánicas de un talud

Fuente: Gerscovich (2012)

Elaboración: Gerscovich (2012)

1.3.4. Ábacos de Hoek y Bray.

El método es una mejora a los ábacos de Taylor, considera la existencia de presiones intersticiales (red de filtración en régimen estacionario) con cinco casos respecto a la posición de nivel freático: totalmente saturado, totalmente seco y tres casos intermedios donde la línea de saturación es paralela al talud (ver anexo A.3).

El método desarrollado por Hoek y Bray (1997) se basa en cuatro hipótesis principales: el material del talud es homogéneo (suelo o roca muy fracturada), la falla es por círculo de pie, existe una grieta de tracción encima o debajo de la cresta del talud y la tensión normal se aplica en un único punto de la superficie de falla (Ortuño Abad et al., 2004). En proyectos a largo plazo se usa parámetros efectivos (IGME, 1986).

1.3.5. Ábacos de Janbú.

La metodología desarrollada por Janbú consiste en un conjunto de ábacos que se fundamenta en la existencia de una base firme o estrato resistente a lo largo de la cual se genera una falla de tipo circular. Para el cálculo del factor de seguridad (FS), Janbú incorpora correcciones por efectos del movimiento de agua, grietas de tensión y sobrecargas (Suárez Díaz, 1998).

Según explica Suárez Díaz, (1998) el método es aplicable en taludes con inclinaciones entre 0 a 90° y consideran dos casos de estudio con sus respectivos ábacos:

- 1) Suelos arcillosos sin fricción ($\emptyset = 0$), cuyo tipo de falla (círculo de pie, círculo de profundidad o base y círculo de talud) depende de la inclinación del talud que generalmente se evalúa bajo esfuerzos totales.
- 2) Suelos no cohesivos ($\emptyset > 0$) friccionantes o mixtos, se asume falla por círculo de pie, y se evalúa principalmente bajo esfuerzos totales, aunque también se puede usar parámetros efectivos (C, \emptyset , ru) promedio de todo el talud en base a ponderaciones por la presencia de diferentes estratos.

1.3.6. Método Ordinario o de Fellenius.

Conocido también como método sueco o método U.S.B.R, fue desarrollado en 1927 por Fellenius únicamente para superficies de falla circulares; considera sólo el equilibrio de momentos. Para el cálculo se divide la superficie de rotura asumida en una serie de tajadas verticales o dovelas (figura 6), sobre las cuales actúan: el peso o fuerza de gravedad, las fuerzas de resistencia al corte y las fuerzas de presión de tierras y cortante en las paredes entre dovelas; con la ecuación 4 se calcula el factor de seguridad.

$$FS = \frac{\sum [C * \Delta L + (W * \cos\alpha + S * \cos\alpha - u * \Delta L) * \tan\phi]}{\sum [(W + S) * \sin\alpha] + Q} \quad (4)$$

Dónde:

α = Angulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide de cada dovela.

W = Peso total de cada dovela ($W = \gamma * b * h$).

u = Presión de poros en cada dovela ($u = \gamma_w * h_w$).

ΔL = Longitud de arco de círculo en la base de la dovela ($\Delta L = b / \cos\alpha$)

c, ϕ = Parámetros de resistencia del suelo efectivos (cohesión, fricción interna).

Q = Fuerza horizontal de agua debido a una grieta de tensión.

S = efecto de sobrecarga ($S = q / a$) donde a es la base de la dovela donde actúa una sobrecarga q .

Por la simplicidad del método se recomienda no utilizar para pre-diseños pues los resultados obtenidos pueden ser hasta un 20 % o 30 % menores respecto a otros métodos de equilibrio límite, especialmente cuando se aplica a taludes de poca pendiente con tensiones efectivas y alta presión de poros (Lau y Cheng, 2008). Sin embargo, González y León (2013) consideran que en suelos puramente cohesivos bajo análisis con tensiones totales el método es exacto.

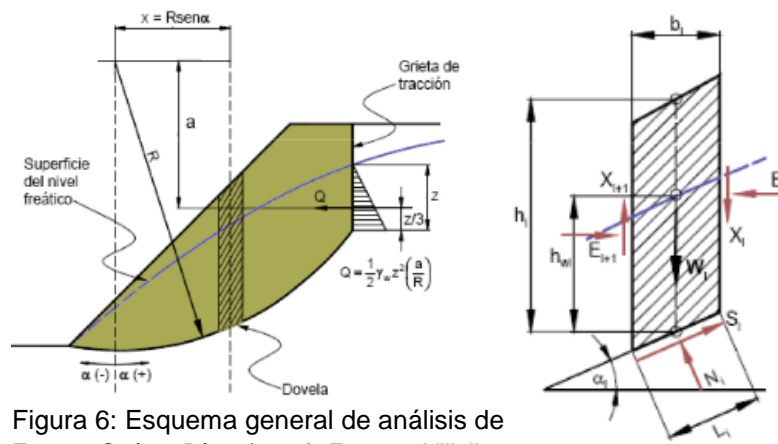


Figura 6: Esquema general de análisis de
Fuente: Suárez Díaz, (1998); Esparza Villalba, (2009)
Elaboración: La autora

1.3.7. Método de Bishop Simplificado.

El método fue propuesto por Bishop en 1955 para análisis de superficies de falla circulares. Su formulación considera equilibrio de momentos, el efecto de las fuerzas horizontales entre dovelas y asume las fuerzas de cortante iguales a cero (Suárez Díaz, 1998). Permite analizar taludes con presencia de nivel freático y pese a que el planteamiento del método (ecuación 5) es implícito, la convergencia es rápida permitiendo analizar diferentes círculos de falla hasta encontrar el mínimo factor de seguridad (FS).

$$FS = \frac{\sum \left[\frac{C * b + (W + S - u * b) * \tan \phi}{\cos \alpha * \left(1 + \frac{\tan \alpha * \tan \phi}{FS} \right)} \right]}{\sum [(Wn + S) * \text{sen } \alpha] + Q} \quad (5)$$

Dónde:

α = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide de cada dovela.

W = Peso total de cada dovela

u = Presión de poros en cada dovela ($u = \gamma_w * h_w$)

b = Ancho de cada dovela

c, ϕ = Parámetros de resistencia del suelo efectivos (cohesión, fricción interna)

Q = Fuerza horizontal de agua debido a una grieta de tensión.

S= efecto de sobrecarga ($S = q / a$) donde a es la base de la dovela donde actúa una sobrecarga q

R = radio del círculo de falla

González y León (2013) recomiendan que si para un mismo círculo posible de falla el FS por el método de Bishop simplificado es menor que el calculado por el método ordinario en taludes con presiones intersticiales altas y rozamientos elevados, Fellenius es la mejor solución. En cambio, Lau y Cheng (2008) afirman que en taludes sin drenaje con cero fricción ($\phi = 0$) los resultados de Bishop simplificado son idénticos a los de Fellenius.

1.3.8. Método de Janbú simplificado.

Desarrollado por Janbú en 1968, el método permite analizar cualquier forma de superficie de rotura a través de la obtención de un parámetro f_o que depende de la curvatura de falla y del tipo de suelo. La metodología es ampliamente usada en China en proyectos de taludes con suelo arenoso (Lau y Cheng, 2008).

En el modelo matemático del método (ecuación 6), Janbú asume que no hay fuerza cortante entre dovelas y aunque satisface el equilibrio de fuerzas, no cumple completamente con el equilibrio de momentos (Suárez Díaz, 2009). Para la determinación del factor f_o se puede emplear el ábaco de la figura 7 o utilizar la ecuación 7 expuesta por Lau y Cheng (2008) donde $K = 0.5$ si $c, \phi > 0$; $K = 0.3$ si $c = 0$ y $K = 0.6$ si $\phi = 0$:

$$FS = \frac{f_o \sum \left\{ \frac{[c'b + (W - ub) * \tan \phi']}{\cos^2 \alpha * (1 + \frac{\tan \alpha * \tan \phi'}{FS})} \right\}}{\sum (W * \tan \alpha) + Q} \quad (6)$$

$$f_o = 1 + \kappa \left[\frac{d}{T} - 1.4 \left(\frac{d}{T} \right)^2 \right] \quad (7)$$

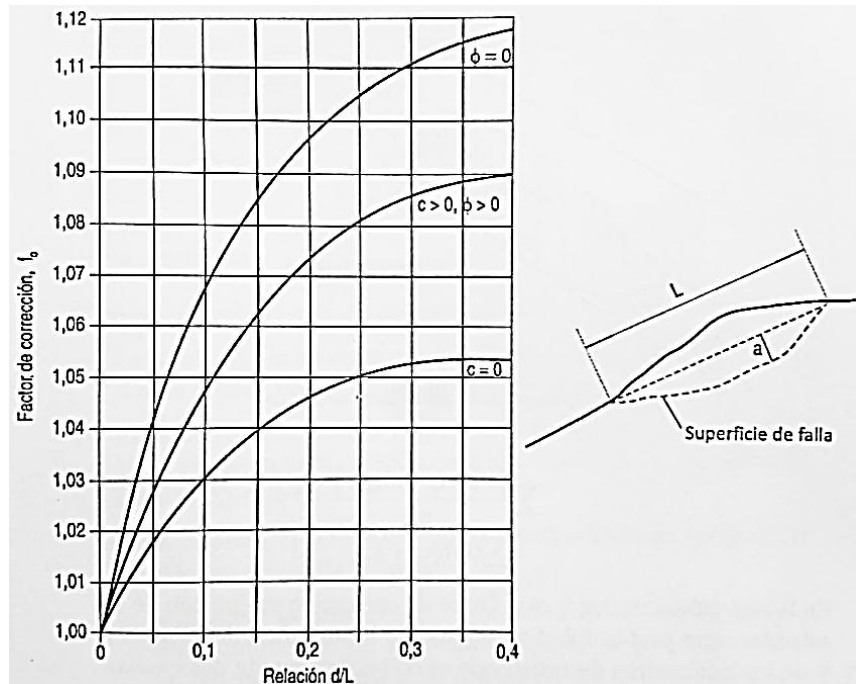


Figura 7: Ábaco de Janbú para factor de corrección f_0
Fuente: Gerscovich (2012)
Elaboración: Gerscovich (2012)

1.3.9. Método de Spencer.

Desarrollado en 1967 para análisis de superficies de falla circulares, su planteamiento matemático satisface totalmente el equilibrio estático y asume que las fuerzas laterales entre dovelas tienen el mismo ángulo de inclinación (θ) (Suárez Díaz, 2009).

La metodología es considerada por Duncan et al. (2014) como la más completa y sencilla; el factor de seguridad (FS) se calcula con las ecuaciones 8, 9 y 10, donde θ es la inclinación de fuerzas entre dovelas y Q la resultante de ellas. Comprende un proceso iterativo asumiendo valores (FS y θ) hasta llegar a un error tolerable que satisfaga el equilibrio de fuerzas y momentos (Gerscovich, 2012).

$$Q = \frac{\frac{cb}{FS} \sec \alpha + \frac{\tan \phi}{FS} (W \cos \alpha - ub \sec \alpha) - W \sen \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left\{ 1 + \frac{\tan \phi}{FS} \tan(\alpha - \theta) \right\}} \quad (8)$$

$$\text{Equilibrio de fuerzas:} \quad \sum Q \sen \theta = 0 \quad (9)$$

$$\text{Equilibrio de momentos:} \quad \sum [Q \cos(\alpha - \theta)] R = 0 \quad (10)$$

El IGME (1986) menciona puede presentarse problemas numéricos de convergencia con resultados no adecuados, ante ello recomienda corroborar con resultados de métodos

aproximados como Bishop simplificado o Janbú. Cabe recalcar que el método de Spencer es un caso particular de la metodología de Morgenstern- Price.

1.3.10. Método de Bishop Riguroso.

Al igual que en el método de Bishop simplificado, en la expresión matemática de Bishop riguroso el coeficiente de seguridad (FS) está implícito (ecuación 11). Generalmente se inicia el cálculo con el FS del método de Fellenius hasta converger en la solución adecuada. La metodología es aplicable a todas las geometrías de rotura y perfiles de suelos (Suárez Díaz, 2009).

El método propone en primer lugar resolver el problema con la ecuación de Bishop simplificado (ecuación 8) y luego con los resultados obtenidos introducir las fuerzas entre dovelas ajustándolas hasta satisfacer todas las ecuaciones de equilibrio horizontales (Ortuño Abad et al., 2004).

$$FS = \frac{\sum \left\{ \left[c' * b + (W + \Delta T - u' * b) * \tan \phi' \right] \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' * \tan \alpha}{FS}} \right\}}{\sum (W * \text{sen} \alpha)} \quad (11)$$

1.3.11. Método de Morgenstern – Price.

Propuesto en el año de 1965, el método asume que la relación entre las fuerzas tangenciales y normales entre dovelas se ajusta a una función $f(x)$ arbitraria definida previamente (figura 8a); sin embargo, Suárez Díaz (1998) expone que la suposición de funciones diferentes tiene muy poco efecto sobre el cálculo de factor de seguridad cuando se satisface el equilibrio estático obteniendo resultados semejantes a los de Spencer.

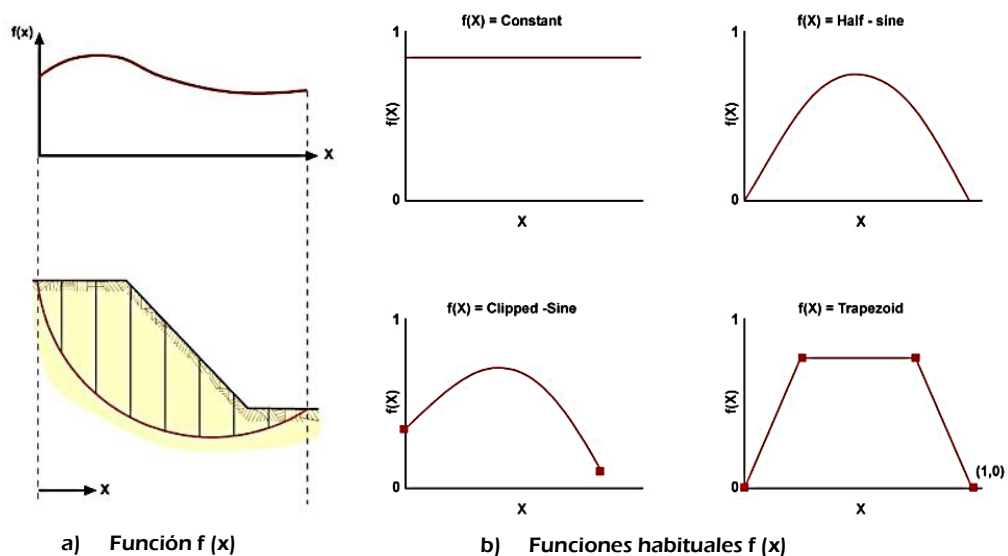


Figura 8: Funciones típicas $f(x)$ aplicadas en método de Morgenstern-Price
 Fuente: (Abad et al., 2004)
 Elaboración: (Abad et al., 2004)

Ortuño Abad et al. (2004) exponen que durante el cálculo puede presentarse problemas de convergencia numérica (tensiones no compatibles con el equilibrio); ante ello recomiendan modificar la función $f(x)$ seleccionada por otra que se ajuste al talud en estudio y corroborar los resultados con métodos aproximados como Bishop simplificado o Janbú. Otras funciones típicas empleadas se muestran en la figura 8b.

1.3.12. Métodos tenso-deformacionales.

Los métodos de análisis tenso-deformacionales se desarrollan con agilidad por la mejora de recursos computacionales que facilitan la resolución de algoritmos y modelos numéricos; la solución se expresa en términos de tensiones y desplazamientos durante el proceso de deformación y rotura (figura 9). El principal campo de aplicación es el “análisis de taludes en suelos y macizos rocosos intensamente fracturados masivos, blandos o poco competentes” (González de Vallejo et al., 2002).

El método que destaca es el que considera elementos finitos FEM pues permite modelar geoméricamente el talud en función de la estructura, estratigrafía e hidrogeología con la aplicación de condiciones de contorno en modelos estratégicamente generados para la representación del comportamiento real del material (Krahn, 2003). Sin embargo, Abad et al. (2004) explican que los métodos no son ampliamente usados pues en la práctica se dificulta el planteamiento adecuado de modelos representativos del terreno.

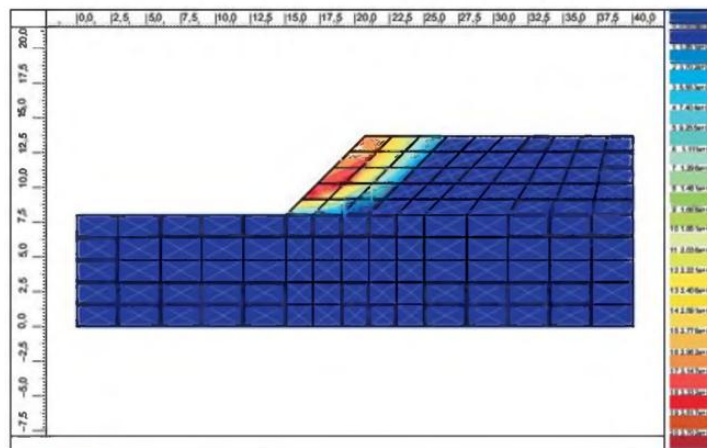


Figura 9: Deformaciones en talud analizado por métodos tenso-deformacionales

Fuente: Programa Zsoil

Elaboración: González de Vallejo et al. (2002)

CAPÍTULO II
(MARCO METODOLÓGICO)

2.1. Generalidades.

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en la presente investigación, se sigue el proceso metodológico esquematizado en la figura 10.

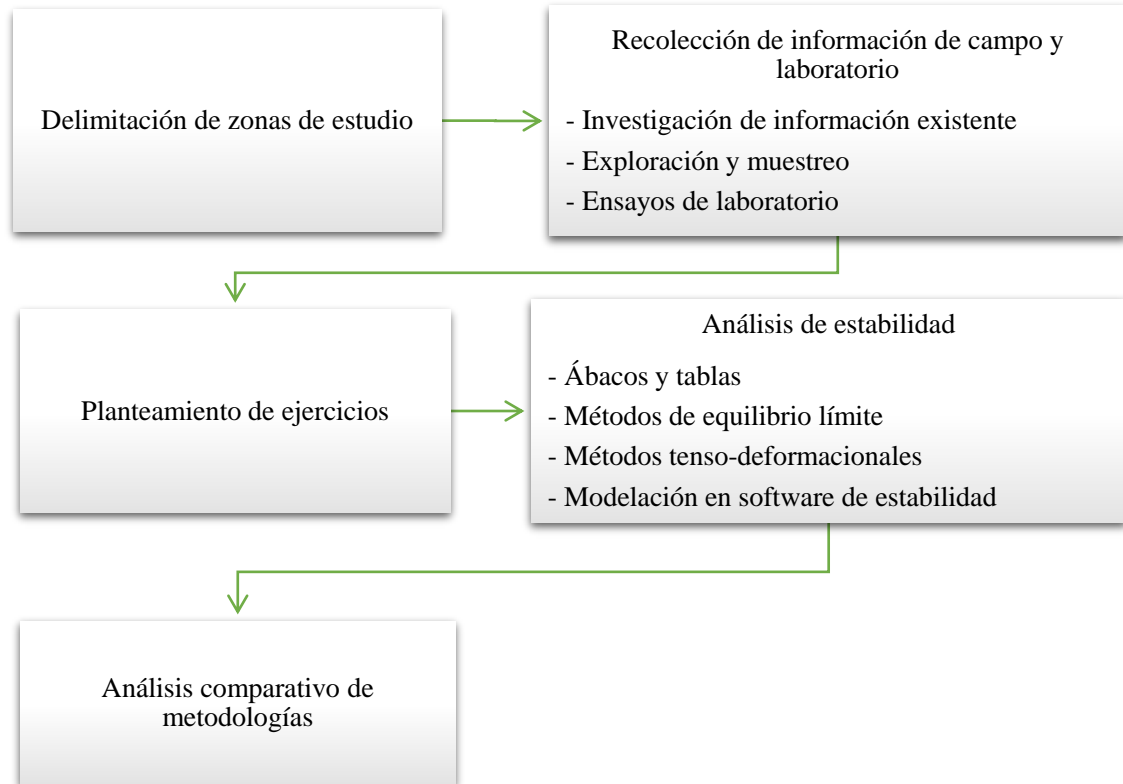


Figura 10: Esquema metodológico

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

2.2. Delimitación de zonas de estudio.

Las zonas de estudio, seleccionadas tras un recorrido e inspección visual dentro de los límites urbanos de la ciudad de Loja, corresponde al sector “Las Pitas” (figura 11) y “Ciudad Victoria” (figura 12); dichos taludes presentan las características mínimas necesarias para la aplicación de la metodología propuesta en la investigación y además, en caso de fallar incurrirían en pérdidas humanas y económicas ya que en sus alrededores se registran principalmente asentamientos de familias de clase media baja.



Figura 11: Talud “Las Pitas”

Fuente: La autora

Elaboración: La autora



Figura 12: Talud “Ciudad Victoria”

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

Debido a que el alcance de la investigación es la aplicabilidad de las diferentes metodologías de cálculo de estabilidad a taludes referenciales, en las zonas de estudio delimitadas únicamente fue necesario recopilar información sobre la topografía y la caracterización geotécnica de los estratos que lo conforman para el planteamiento de ejercicios tipo.

2.3. Recolección de información de campo y laboratorio.

Como fuente principal de información se utilizó la investigación realizada por Bermeo y Bustamante (2011) cuyos parámetros de densidad y resistencia al cortante (cohesión y ángulo de fricción) se actualizaron bajo el sustento de las normativas que se indican en la tabla 2. El criterio de muestreo se basó en la heterogeneidad de los materiales con el fin de reflejar en el modelo geotécnico la variabilidad geomecánica de los estratos identificados que podrían influenciar en la estabilidad del talud (Blake, Hollingsworth, y Stewart, 2002).

Tabla 2. Ensayos de laboratorio realizados

Ensayos de laboratorio	No. Ensayos realizados	Normativa aplicada
Contenido de Humedad	12	NTE INEN 0862:
Límite Líquido	12	NTE INEN 0691:
Límite Plástico	12	NTE INEN 0692:
Granulometría	12	ASTM D-422
Triaxial UU	12	ASTM D 2850-82

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

2.4. Planteamiento de ejercicios tipo.

El planteamiento de ejercicios comprende la delimitación de los perfiles a evaluar en los taludes seleccionados en función de los posibles escenarios que puedan alterar las condiciones de estabilidad (Gerscovich, 2012). En base a la topografía se generaron perfiles para el análisis de cada talud, se identificó la geología que normalmente se interpreta en términos de estratos o zonas de materiales con iguales características y se definió la ubicación de posibles niveles freáticos (Geotechnical Engineering Office, 2011).

En las tablas 3 y 4 se resume las características geotécnicas de los perfiles propuestos como ejercicios tipo; todos los parámetros de resistencia al corte están en términos de esfuerzos totales.

Tabla 3. Característica geotécnica de perfiles talud “Las Pitás”

Estrato	Mohr - Coulomb	Perfiles		
		Ejercicio 1	Ejercicio 2	Ejercicio 3
	Clasificación	SM	SW	SW
	Y sat (kN/m ³)	16	14,5	14,5
	C _u (kN/m ²)	4	0,5	0,5
1) Corona	Ø _u (°)	24	32	32
	E (kN/m ²)	13800	17300	17300
	ν	0,3	0,25	0,25
	h (m)	4	12	7

Continúa Tabla 3

Continúa Tabla 3

Estrato	Mohr - Coulomb		Perfiles		
			Ejercicio 1	Ejercicio 2	Ejercicio 3
2) Media Ladera	Clasificación		SC - Media	SC-Baja	SC-Media
	Y sat	(kN/m ³)	17,6	17	17,6
	C _u	(kN/m ²)	50	10	50
	Ø _u	(°)	24	29	24
	E	(kN/m ²)	22100	44900	22100
	ν	-	0,33	0,4	0,33
	h	(m)	35	14	18
3) Pie de talud	Clasificación		-	SC-Media	CH
	Y sat	(kN/m ³)	-	17,6	21
	C _u	(kN/m ²)	-	50	40
	Ø _u	(°)	-	24	6
	E	(kN/m ²)	-	22100	20700
	ν	-	-	0,33	0,35
	h	(m)	-	35	29

Fuente: Bermeo y Bustamante, 2011

Elaboración: La autora

Tabla 4. Característica geotécnica de perfiles talud "Ciudad Victoria"

Estrato	Mohr - Coulomb		Perfiles	
			Ejercicio 1	Ejercicio 2
1) Corona	Clasificación		SP	SP
	Y sat	(kN/m ³)	19,17	19,17
	C _u	(kN/m ²)	33,34	33,34
	Ø _u	(°)	33	33
	E	(kN/m ²)	17300	17300
	ν	-	0,25	0,25
	h	(m)	10,5	3,85
2) Media Ladera 1	Clasificación		SM-SC	SM-SC
	Y sat	(kN/m ³)	17,86	17,86
	C _u	(kN/m ²)	30,4	30,4
	Ø _u	(°)	24	24
	E	(kN/m ²)	22100	22100
	ν	-	0,33	0,33
	h	(m)	5,2	6,55

Continúa Tabla 4

Continúa Tabla 4

Estrato	Mohr - Coulomb	Perfiles	
		Ejercicio 1	Ejercicio 2
3) Media Ladera 2	Clasificación	MH	MH
	Y sat (kN/m ³)	17,48	17,48
	C _u (kN/m ²)	81,4	81,4
	Ø _u (°)	29	29
	E (kN/m ²)	20700	20700
	ν	-	0,35
	h (m)	3,2	1,10
4) Pie de talud	Clasificación	CH	CH
	Y sat (kN/m ³)	19,45	19,45
	C _u (kN/m ²)	78,75	78,75
	Ø _u (°)	12	12
	E (kN/m ²)	31000	31000
	ν	-	0,35
	h (m)	13,10	15,60

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

2.5. Análisis de estabilidad.

Todos los métodos de cálculo mediante ábacos y tablas mencionados en el capítulo 1 aproximan el factor de seguridad rápidamente y ello resulta idóneo para análisis preliminares, verificaciones de métodos más detallados e inclusive para cálculos completos (USACE, 2003). El Comité American Society of Civil Engineers (ASCE, 2002) recomienda emplear el método de Spencer y verificar los resultados para superficies de falla circulares por Taylor y Bishop simplificado.

Por otro lado el método de Fellenius pese a ser pionero en el análisis de taludes mediante dovelas, no se recomienda ya que es conservador y en círculos de falla profundos o con presión de poros elevados da resultados poco confiables (Gerscovich, 2012); ello se ha corroborado en diversas investigaciones como la de Espinoza y Tapia (2013) o Sanhueza y Rodríguez (2012).

Tras analizar lo anteriormente expuesto, el análisis estático de estabilidad en la investigación se limitó a las siguientes metodologías:

- *Ábacos y tablas:* Talud Infinito, Hoek & Bray, Taylor
- *Métodos de equilibrio límite:* Bishop simplificado, Janbú simplificado, Spencer

- *Métodos tenso-deformacionales:* FEM (método de elementos finitos) con software de estabilidad Phase2 (versión de prueba).

Los ejercicios planteados analizados con las metodologías de cálculo de estabilidad, permiten representar adecuadamente los mecanismos probables de falla del talud identificados a priori en campo. En la tabla 5 se compila los criterios de análisis considerados en la selección de las metodologías aplicadas, mientras que en la tabla 6 se resume las características principales de los ejercicios planteados identificados a través del reconocimiento e inspección visual en campo.

Tabla 5. Criterios para selección de metodologías de cálculo

Método de Análisis	Criterios de análisis
Talud Infinito	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie potencial de falla extensa comparada con su espesor y menor a altura del talud. • Suelo poco o nada cohesivo inestable sobre estrato resistente. • Superficie potencial de falla paralela a perfil del talud. • Perfil de talud geoméricamente regular. • Admite presencia de nivel freático.
Hoek & Bray	<ul style="list-style-type: none"> • Talud homogéneo e isotrópico. • Superficie potencial de falla por círculo de pie conectado a grieta de tracción. • Superficie de falla probable en macizos rocosos o suelos granulares ($\phi > 5^\circ$). • Perfil de talud geoméricamente regular. • Admite presencia de nivel freático
Taylor	<ul style="list-style-type: none"> • Talud regular, homogéneo e isotrópico. • Superficie potencial de falla circular (círculo de talud, círculo de pie o círculo de base). • Superficie de falla probable en suelos cohesivos saturados. • Perfil de talud geoméricamente regular. • Admite presencia de nivel freático
Bishop Simplificado	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie potencial de falla circular. • Perfil de talud geoméricamente regular o irregular. • Talud estratificado con propiedades heterogéneas. • Admite presencia de nivel freático

Continúa Tabla 5

Continúa Tabla 5

Método de Análisis	Criterios de análisis
Janbú Simplificado	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie potencial de falla cualquiera. • Perfil de talud geoméricamente regular o irregular. • Talud estratificado con propiedades heterogéneas. • Admite presencia de nivel freático.
Spencer	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie potencial de falla circular. • Perfil de talud geoméricamente regular o irregular. • Talud estratificado con propiedades heterogéneas. • Admite presencia de nivel freático

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

Tabla 6. Inspección visual en campo de ejercicios a evaluar.

Ejercicio	Reconocimiento visual en campo
1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deslizamiento superficial de espesor menor a la altura del talud. ▪ No presencia de nivel freático. ▪ Estrato de suelo poco cohesivo ($c < 4 \text{Kn/m}^2$) apoyado en estrato resistente paralelo a perfil de talud. ▪ Talud conformado por arenas limosas y arcillosas ($\phi = 24^\circ$). ▪ Buzamiento menor a 53° respecto a la horizontal.
2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erosión en media ladera por intemperismo. ▪ Deslizamiento superficial de espesor menor a la altura del talud. ▪ No presencia de nivel freático. ▪ Estratificación no paralela a perfil de talud. ▪ Talud conformado por arenas limosas y arcillosas ($\phi > 24^\circ$). ▪ Buzamiento menor a 53° respecto a la horizontal.
3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estrato ubicado en corona de suelo poco cohesivo inestable apoyado en estrato resistente a escasa profundidad. ▪ Estratificación paralela a perfil de talud. ▪ No presencia de nivel freático. ▪ Talud conformado por arenas arcillosas ($\phi > 24^\circ$) y en el pie por arcilla de alta plasticidad. ▪ Buzamiento menor a 53° respecto a la horizontal.

Continúa Tabla 6

Continúa Tabla 6

Ejercicio	Reconocimiento visual en campo
4	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estratos superiores conformados por arenas limosas y arcillosas ($\phi > 24^\circ$). ▪ Estratos inferiores conformados por suelo fino (limo-arcilla) de alta plasticidad. ▪ No presencia de nivel freático. ▪ Buzamiento menor a 53° respecto a la horizontal. ▪ Estratificación no paralela a perfil de talud.
5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estratos superiores conformados por arenas limosas y arcillosas ($\phi > 24^\circ$) y estratos inferiores por suelos finos (limo-arcilla) de alta plasticidad. ▪ No presencia de nivel freático. ▪ Buzamiento menor a 53° respecto a la horizontal. ▪ Estratificación no paralela a perfil de talud.

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

Con base en las tablas 5 y 6, se seleccionó para los ejercicios planteados las metodologías de análisis de estabilidad que mejor se adapten a sus características particulares; ello se resume en la tabla 7.

Tabla 7. Métodos de cálculo seleccionados para cálculo de estabilidad

Método de Análisis	Ejercicios planteados				
	1	2	3	4	5
Talud Infinito	✓	✓	✓	-	-
Hoek & Bray	✓	✓	✓	✓	✓
Taylor	✓	✓	✓	✓	✓
Bishop simplificado	✓	✓	✓	✓	✓
Janbú Simplificado	✓	✓	✓	✓	✓
Spencer	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

Otra consideración que se tomó en cuenta durante el cálculo fue la corrección de los parámetros de resistencia al corte pues algunas metodologías requieren que las características geomecánicas se ingresen en términos de esfuerzos efectivos (condiciones drenadas); para ello se usó un proceso iterativo con las ecuaciones 12 y 13 mencionadas en Gerscovich (2012) tomando como punto de comparación una convergencia al 1 % de error.

$$\phi'_d = \arctan\left(\frac{\tan \phi_u}{FS}\right) \quad (12)$$

$$c'_d = \left(\frac{c_u}{FS}\right) \quad (13)$$

Dónde: c'_d = cohesión drenada corregida

c_u = cohesión no drenada

ϕ'_d = ángulo de fricción drenado corregido

ϕ_u = ángulo de fricción no drenado

FS = factor de seguridad

Finalmente los análisis de estabilidad se validaron a través de la modelación de los ejercicios planteados en dos software de estabilidad (versiones de prueba): uno que procesa los modelos bajo metodologías de equilibrio límite (Slide v.5.0) y otro bajo métodos tenso-deformacionales (Phase2).

El análisis final de la investigación se enfocó en interpretar los resultados obtenidos a través de cada metodología; principalmente analizando las condiciones o parámetros más influyentes en la variabilidad de factores de seguridad estimados en cada método.

CAPÍTULO III
(RESULTADOS Y DISCUSIÓN)

3.1. Resultados análisis de estabilidad.

Todos los ejercicios planteados se analizaron a corto plazo con deformaciones totales, pues se evaluó como condición crítica el “final de la construcción” sin considerar disipación del exceso de presión de poros (Gerscovich, 2012); es decir el factor de seguridad se calculó “al cabo de un periodo de tiempo lo suficientemente corto, con relación a la permeabilidad del terreno, para que no haya habido prácticamente drenaje producido por el cambio de tensiones” (Jiménez Salas, 1980, p.543).

Los resultados del análisis manual mediante las metodologías seleccionadas en el capítulo anterior en base a la inspección visual en campo y los criterios principales que considera cada método (ver tablas 5, 6 y 7), se muestran a continuación para los cinco ejercicios propuestos; el proceso seguido para llegar a dichos resultados se explica a mayor detalle en el primer ejercicio.

3.1.1. Ejercicio 1.

El análisis corresponde a un talud de 39 metros de altura con el perfil del anexo B1 y las características geomecánicas de la tabla 3. Para el cálculo con metodologías de ábacos se consideró un perfil de talud reconstruido con 25° de buzamiento respecto a la horizontal tomando como criterio principal que por la acción humana en proyectos de expansión urbana el ingeniero geotécnico debe dar la altura e inclinación adecuada que garanticen la estabilidad,

Los resultados obtenidos aplicando las metodologías seleccionadas que se mencionó en el apartado 2.5 se describen a continuación.

Resultado de análisis por talud Infinito.

Para la idealización del modelo se consideró el buzamiento del talud, el suelo de corona como homogéneo e isotrópico y la potencia del estrato de 4 metros como masa deslizante (Anexo C.1) que concuerda con la inspección de campo adaptándose a la falla de talud infinito (plano de rotura tangente al estrato resistente 2). Se calculó el factor de seguridad en términos de parámetros totales y efectivos como sigue:

- 1) Se asumió un factor de seguridad FS_{as} para corregir los parámetros de resistencia al corte (ϕ_d y C_d) con las ecuaciones 12 y 13 (ver capítulo 2).
- 2) Con los ábacos (anexo A1) se calculó el factor de seguridad cotejando con la ecuación 1.
- 3) Se realizó varias iteraciones hasta igualar el FS_{as} con FS con convergencia menor al 1 %.

El factor de seguridad calculado con esfuerzos efectivos (ϕ_d y C_d) fue 1.055, mientras que considerando esfuerzos totales (ϕ_u y C_u) 1.118.

Resultado de análisis por ábacos de Hoek & Bray.

El método se aplicó considerando suelo homogéneo e isotrópico con las características del estrato 2 que presenta mayor cohesión al ser más propenso a fallar en caso de saturación del suelo; asimismo se empleó el buzamiento y altura del talud. El proceso de análisis se explica a continuación:

- 1) Se seleccionó las Cartas 1 y 2 (anexo A.3) correspondientes a talud totalmente seco y al afloramiento de nivel freático a una distancia de la cresta del talud igual a ocho veces su altura respectivamente.
- 2) Se asumió un factor de seguridad FS_{as} para corregir los parámetros de resistencia al corte (ϕ_d y C_d) con las ecuaciones 12 y 13 (ver capítulo 2).
- 3) Dado que la metodología es dirigida principalmente a la caracterización geomecánica de rocas (Hoek y Bray, 1981), el factor de seguridad FS se calculó en función del ángulo de fricción (eje Y).
- 4) El FS_{as} se igualó con FS a través de iteraciones hasta converger en menos del 1 %.
- 5) Con la ecuación 14 se calculó la profundidad de la grieta de tracción, mientras que su ubicación respecto al borde del talud se definió con el ábaco correspondiente (anexo A.3).

$$Z_T = \frac{2c_d}{\gamma \left[\tan \left(45 - \frac{\phi_d}{2} \right) \right]} \quad (14)$$

Dónde: Z_T = profundidad grieta de tracción

C_d = cohesión drenada

ϕ_d = ángulo de fricción drenado

γ = peso específico del suelo

Los factores de seguridad calculados con las cartas 1 y 2 fueron: 1.36 y 1.2 respectivamente y la superficie potencial de falla fue un círculo de pie conectado con una grieta de tracción de 5.76 metros de profundidad a 0.78 metros de la corona del talud (anexo C.1).

Resultado de análisis por ábacos de Taylor.

Para el cálculo se consideró: un talud homogéneo e isotrópico con la media ponderada de las propiedades geomecánicas de los estratos presentes (ver figura 5), el buzamiento del talud y su altura. El factor de seguridad se obtuvo como sigue:

- 1) Se asumió un factor de seguridad FS_{as} .
- 2) Se calculó el número de estabilidad N^{-1} y se leyó ϕ_d con los ábacos del anexo A.2.

- 3) El factor de seguridad FS se obtuvo de la relación $FS = \tan \hat{\phi}_u / \tan \hat{\phi}_d$.
- 4) A través de un proceso iterativo hasta converger en menos del 1 %, el FS_{as} se igualó con FS (IGME, 1986, p.253).
- 5) Se identificó el círculo de falla más desfavorable adoptando como límite del círculo una zanja en la corona del talud a 3 metros del borde (distancia mínima solicitada para la implementación de zanjas de coronación según Pulecio Díaz, 2015, p.13 y Suárez Díaz, 1998, p.432).

El factor de seguridad obtenido fue 1.73 con $\hat{\phi}_d$ igual a 14.4° ; en el anexo C1 se muestra la superficie de falla más desfavorable encontrada que corresponde a un círculo de pie que penetra debajo del mismo.

Resultado de análisis por Bishop simplificado.

El análisis se realizó en términos de esfuerzos totales considerando la heterogeneidad del suelo y las irregularidades de la superficie del talud. El procedimiento seguido fue:

- 1) Se asumió un círculo de falla y un factor de seguridad FS_{as} .
- 2) La superficie de rotura analizada se subdividió en dovelas con base aproximadamente homogénea considerando que estas no contengan discontinuidades en la superficie del talud (Gerscovich, 2012).
- 3) Se calculó el factor de seguridad FS analizando el equilibrio de fuerzas de cada dovela y el equilibrio de momentos del conjunto con la ecuación 5 (ver capítulo 1) a través de un proceso iterativo hasta igualar FS_{as} y FS. Se recomienda remitirse al apéndice F de “Engineering and Desing. Slope Stability” (USACE, 2003) para mayor detalle.

El círculo de falla con menor factor de seguridad igual a 0.999 tuvo radio de 19.28 metros (anexo C.1). En el anexo D1 se adjunta el cuadro de cálculos correspondiente.

Resultado de análisis por Janbú simplificado.

El análisis se realizó en términos de esfuerzos totales considerando la heterogeneidad del suelo y las irregularidades de la superficie del talud. Se siguió el procedimiento detallado a continuación:

- 1) Se repitió los pasos 1 y 2 del análisis por Bishop Simplificado.
- 2) La profundidad y longitud de falla se midió para calcular el factor de corrección f_0 con la ecuación 7 (ver capítulo 1).
- 3) Se calculó el factor de seguridad FS con la ecuación 6 (ver capítulo 1) a través de un proceso iterativo hasta igualar FS con FS_{as} .

El círculo de falla crítico coincidió con el de Bishop simplificado, con radio de 19.28 metros, profundidad de 1.6646 metros y longitud de 11.2725 metros (ver anexo C1); el factor de corrección f_0 fue 1.059. Finalmente el factor de seguridad del talud fue igual a 1.06, en el anexo D1 se adjunta el cuadro de cálculos correspondiente.

Resultado de análisis por Spencer.

El análisis se realizó en términos de esfuerzos totales considerando la heterogeneidad del suelo y las irregularidades de la superficie del talud. El procedimiento seguido fue:

- 1) Se repitió los pasos 1 y 2 del análisis por Bishop Simplificado.
- 2) Se asumió la inclinación de fuerzas entre dovelas Θ y la fuerza entre dovelas Q se calculó con la ecuación 8 (ver capítulo 1) asumiendo un factor de seguridad FS_{as} .
- 3) Se calculó el factores de seguridad por equilibrio de fuerzas $FS_{(eq. f)}$ con la ecuación 9 (ver capítulo 1) a través de un proceso iterativo hasta igualar FS_{as} y $FS_{(eq. f)}$.
- 4) Se calculó el factores de seguridad por equilibrio de momentos $FS_{(eq. m)}$ con la ecuación 10 (ver capítulo 1) a través de un proceso iterativo hasta igualar FS_{as} y $FS_{(eq. m)}$.
- 5) Para el círculo de falla evaluado, asumiendo diferentes inclinaciones (Θ) se comparó los factores de seguridad obtenidos hasta que $FS_{(eq. f)} = FS_{(eq. m)}$. Se recomienda remitirse a Gerscovich, 2012, (p. 157) para mayor detalle.

El círculo de falla crítico fue idéntico al de Bishop simplificado y Janbú simplificado (ver anexo C1). El factor de seguridad calculado fue 0.998 correspondiente a 31.50° de inclinación de las fuerzas entre tajadas; en el anexo D.1 se adjunta el cuadro de cálculos y la figura 13 muestra la convergencia del método de Spencer para la superficie de falla evaluada.

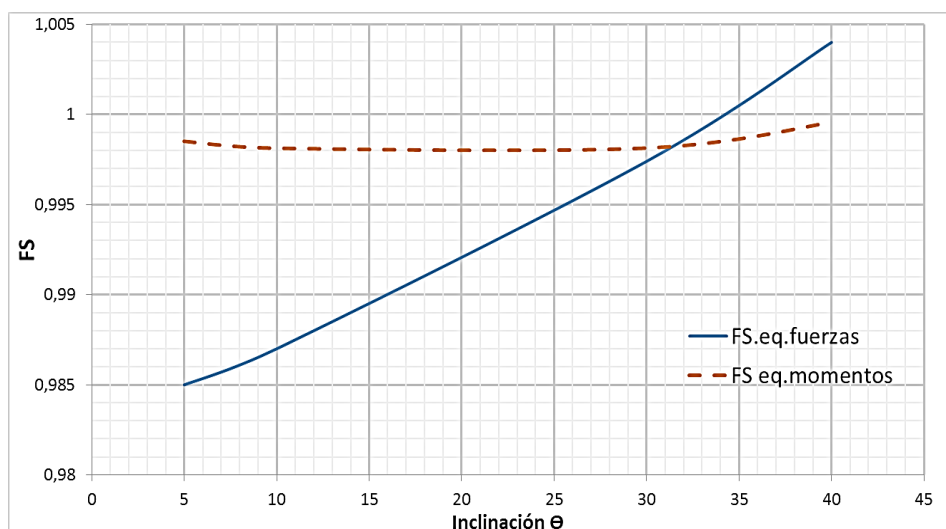


Figura 13: Convergencia de Spencer en ejercicio 1

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

3.1.2. Ejercicio 2.

El análisis se efectúa a un talud de 61 metros de altura con el perfil del anexo B2 y características geomecánicas mostradas en la tabla 3. La erosión que presenta en la media ladera propia del intemperismo se despreció en los cálculos mediante ábacos adoptando 35° de buzamiento respecto a la horizontal. El resumen de resultados obtenidos se encuentra en los anexos C.2 y D.2.

Resultado de análisis por Talud Infinito.

Pese a que no existe un plano de falla paralelo al perfil de talud, en campo se observó un deslizamiento superficial que se adapta a la falla de talud infinito. Para el análisis se consideró altura de masa deslizante igual a 4 metros, suelo homogéneo e isotrópico con las características del estrato de corona y el buzamiento medio del talud. Los factores de seguridad calculados fueron 0.955 y 0.9108 con esfuerzos efectivos y totales respectivamente.

Resultado de análisis por ábacos de Hoek y Bray.

El método se aplicó por las características mecánicas de los estratos; para el cálculo se consideró suelo homogéneo e isotrópico con las características del estrato ubicado en el pie que posee mayor cohesión, así como el buzamiento y altura del talud.

El factor de seguridad obtenido con la carta 1 fue 1.08 y con la carta 2, 1.02. La superficie potencial de falla fue un círculo de pie circular conectado a una grieta de tracción de 5.61 metros de profundidad a 4.88 metros del borde del talud.

Resultado de análisis por ábacos de Taylor.

Los ábacos se aplicaron considerando suelo homogéneo e isotrópico equivalente con la media ponderada en función de la potencia de los estratos, el buzamiento del talud y su altura. El factor de seguridad calculado fue 1.16 con ϕ_d igual a 23.5°, cuya superficie de falla más desfavorable correspondió a un círculo superficial de pie limitado por una zanja en la corona del talud a 3 metros del borde.

Resultado de análisis por Bishop simplificado.

El método se aplicó considerando la heterogeneidad de las propiedades geomecánicas del talud y la irregularidad de su perfil a través de un análisis con esfuerzos totales. El círculo de falla crítico encontrado con FS igual a 0.815 tuvo radio de 41.79 metros.

Resultado de análisis por Janbú.

El análisis se realizó en términos de esfuerzos totales considerando la heterogeneidad del suelo y las irregularidades de la superficie del talud. El círculo de falla crítico resultado del

análisis (41.79 metros de radio) coincidió con Bishop simplificado; la profundidad y longitud de la superficie de falla fue de 0.9545 y 17.1163 metros respectivamente. El factor de corrección f_0 aplicado fue 1.026 y se obtuvo 0.838 de factor de seguridad.

Resultado de análisis por Spencer.

El círculo de falla crítico, resultado del análisis, fue el mismo que se encontró por Bishop simplificado y Janbú simplificado. El factor de seguridad calculado fue de 0.815 correspondiente a 39.7° de inclinación de las fuerzas entre tajadas; en la figura 14 se muestra la convergencia del método de Spencer para la superficie de falla evaluada.

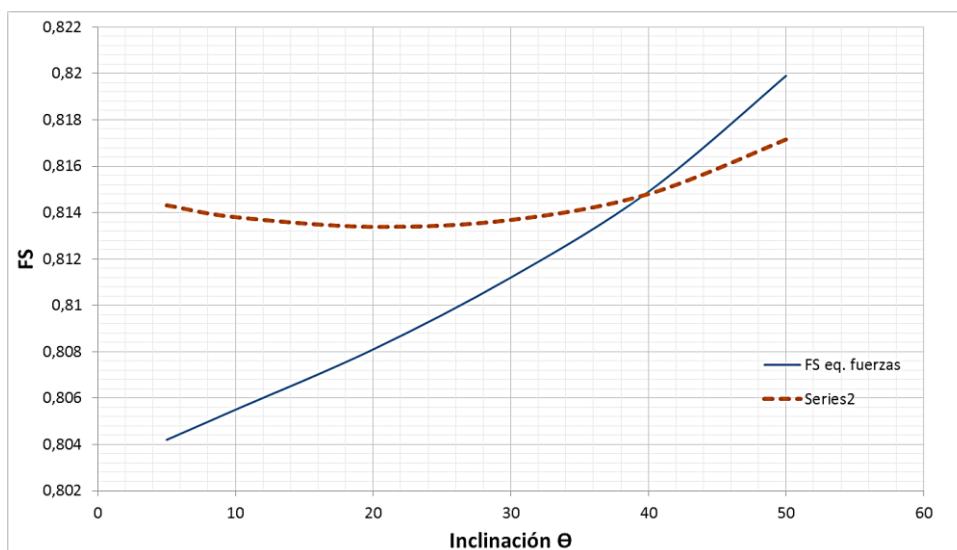


Figura 14: Convergencia de Spencer en ejercicio 2

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

3.1.3. Resumen de resultados.

Los factores de seguridad calculados de los ejercicios planteados se sintetizan en la tabla 8. Los FS mínimos obtenidos en cada metodología presentaron superficies de rotura diferente. En el anexo E se adjuntan las modelaciones realizadas con el software de estabilidad Phase2 (versión de prueba) mediante métodos de elementos finitos FEM.

Los factores de seguridad obtenidos por métodos de dovelas (cálculos manuales) se validaron a través del software Slide v.5.0 (versión de prueba) dirigido al análisis de estabilidad con metodologías de equilibrio límite LEM. La mayor divergencia observada fue en los resultados de Janbú simplificado por inexactitud en la medición de la profundidad de falla que condiciona directamente el cálculo del factor de corrección f_0 (tabla 9). Otro aspecto que influyó en las diferencias de los FS calculados manualmente fue el número de dovelas consideradas.

Tabla 8. Factores de seguridad obtenidos por diferentes métodos (esfuerzos totales)

MÉTODO	EJERCICIO				
	1	2	3	4	5
<i>Talud infinito</i>	1,118	0,911	0,650	-	-
<i>Hoek y Bray carta 1</i>	1,360	1,080	1,060	1,150	1,304
<i>Hoek y Bray carta 2</i>	1,200	1,020	1,000	1,118	1,190
<i>Ábacos de Taylor</i>	1,730	1,160	0,750	1,760	1,860
<i>Bishop simplificado</i>	0,999	0,815	0,631	1,437	1,801
<i>Janbú simplificado</i>	1,060	0,838	0,652	1,399	1,729
Spencer	0,998	0,815	0,630	1,437	1,790
FEM	1,030	0,930	0,610	1,430	1,730

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

Tabla 9. Factores de seguridad calculados manualmente y con software (métodos de dovelas).

Ejercicios	Cálculos manuales			Cálculos Software		
	Bishop simplificado	Janbú simplificado	Spencer	Bishop simplificado	Janbú simplificado	Spencer
1	0,999	1,060	0,998	1,001	1,020	0,996
2	0,815	0,838	0,815	0,817	0,823	0,812
3	0,631	0,652	0,630	0,635	0,633	0,630
4	1,437	1,399	1,437	1,475	1,427	1,460
5	1,801	1,729	1,790	1,766	1,690	1,758

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

El cálculo manual de los FS en métodos de dovelas otorgó resultados similares a los de Slide v.5.0, corroborándose la veracidad de los análisis efectuados.

3.2. Análisis comparativo de metodologías

El cálculo de estabilidad es un problema indeterminado, desde un planteamiento estático el número de ecuaciones disponibles es inferior al de las incógnitas buscadas, por ende las

diferentes metodologías dan solución a través de la incorporación de hipótesis. El anexo F presenta el contraste de dichos supuestos.

Previo al análisis comparativo es necesario recalcar el tipo de rotura suscitado en los taludes analizados:

- *Ejercicios 1, 2 y 3:* deslizamientos superficiales planares
- *Ejercicios 4 y 5:* deslizamientos circulares profundos.

Lo anterior corroboró a Melentijevic (2005) quien expresa que deslizamientos con círculos profundos ocurren principalmente en los materiales más cohesivos y fallas superficiales en los suelos más friccionantes porque la componente de resistencia al corte aumenta con la profundidad por ser dependiente del esfuerzo normal.

La figura 16 muestra la variación del factor de seguridad FS calculado por las diferentes metodologías. A priori se observa que los resultados de métodos de dovelas y FEM convergen con alta proximidad entre sí; al contrario, los FS calculados con Taylor y Hoek y Bray difieren considerablemente de métodos precisos como Spencer.

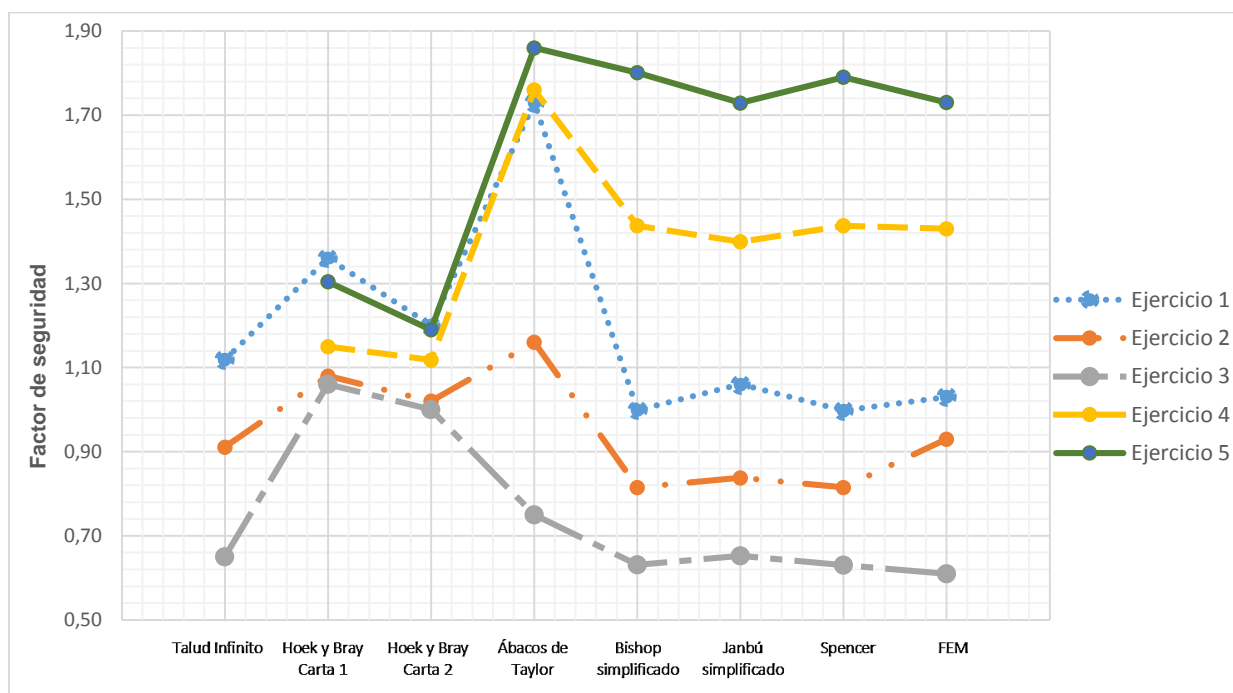


Figura 16: Variación factores de seguridad por diversos métodos

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

La comparación entre metodologías se basó principalmente en:

- Tipo de falla suscitado.
- Superficies de falla consideradas por los métodos.
- Semejanzas en hipótesis de equilibrio estático.

- Convergencia numérica de los FS calculados.

Comparativa ábacos de Taylor vs Spencer.

Partiendo de un análisis teórico se esperaría que los FS calculados por ambos métodos sean próximos pues las dos metodologías consideran equilibrio de fuerzas y momentos con la única diferencia que Taylor analiza un bloque circular compacto de suelo, mientras Spencer establece el equilibrio por cada dovela en que se ha subdividido la superficie de falla.

Las características intrínsecas de los taludes se acoplaron a los requerimientos de utilización de los ábacos homogeneizando los parámetros de resistencia al corte con la media ponderada y aplicando el buzamiento medio del talud. Inicialmente se proyectó como superficie crítica de falla círculos de talud en los ejercicios con deslizamientos superficiales planares y círculos de pie en el análisis de ejercicios con deslizamientos circulares profundos.

Sin embargo, los ábacos de Taylor sobreestimaron el FS en el rango de 19 % a 73 % respecto a Spencer en los ejercicios 1, 2, 3 y 4 por la marcada variabilidad de los parámetros de resistencia al corte con la profundidad que condujo a simplificaciones poco realistas. Las características geotécnicas equivalentes aplicadas al talud del ejercicio 5 cumplieron las condicionantes establecidas por el método de Taylor sobreestimando el FS en 3.9 %.

Los resultados obtenidos demuestran que los ábacos de Taylor sobreestiman la estabilidad del talud con factores de seguridad poco conservadores. Debe recalarse que estos resultados son exclusivos de la investigación por ser casos puntuales donde se modificó las propiedades iniciales de los taludes propuestos.

Comparativa ábacos de Hoek y Bray vs Bishop simplificado.

El método de Bishop simplificado teóricamente es el más cercano a la propuesta metodológica de Hoek y Bray; ambos analizan superficies de falla circulares con las mismas condiciones de equilibrio estático. Aunque los ábacos están principalmente dirigidos al análisis de taludes en roca, Ortuño Abad et al. (2014) sugieren analizar como suelo homogéneo taludes que evidencien fuerte alteración y fracturación del macizo rocoso reflejado en la presencia de estratos granulares.

Los ejercicios se adaptaron a las solicitudes de Hoek y Bray considerando la pendiente media de los taludes y suelo homogéneo – isotrópico en función de los estratos más propensos a fallar en caso de saturación (suelos cohesivos). La aplicación de Bishop simplificado no requirió modificaciones de las propiedades iniciales.

Hoek y Bray (1977) consideran en taludes con fricción mayor a 5° los círculos de pie como superficies de rotura crítica más probables. Esta hipótesis no se cotejó en los ejercicios 1, 2 y

3 ($\emptyset > 6^\circ$) los cuales fallaron de forma superficial planar por la presencia de estratos superiores débiles e incidió en la sobreestimación de los FS calculados entre 20 % y 68 % respecto a Bishop simplificado.

Al contrario, en los ejercicios 4 y 5 ($\emptyset > 12^\circ$), los taludes efectivamente fallaron por círculos de pie y los ábacos de Hoek y Bray subestimaron los FS en el rango de 20 % a 34 % en comparación a Bishop simplificado. La dispersión de los resultados no significa que el método sea incorrecto, sino se atribuye a la homogeneización de las características geométricas y de estratificación iniciales.

Comparativa Talud infinito vs Janbú simplificado.

Los dos métodos satisfacen en igualdad de condiciones el equilibrio estático de fuerzas horizontales y desprecian el de momentos. Los ábacos de talud infinito analizan un bloque rectangular como zona de falla mientras Janbú simplificado admite cualquier forma de superficie de rotura.

Previo al cálculo con ábacos se acoplaron los ejercicios al modelo de falla de talud infinito idealizando suelo homogéneo – isotrópico y se simplificó la geometría usando su pendiente promedio. En cambio, Janbú simplificado consideró en su análisis la heterogeneidad de las características geomecánicas y las irregularidades del perfil.

La simplificación de las condiciones reales de los taludes (resistencia al corte y buzamiento) fue adecuada; los factores de seguridad calculados fueron próximos a los de Janbú simplificado con sobreestimación de 5.5 %, 8.7% y 0.3 % en los ejercicios 1, 2 y 3 respectivamente.

La inexistencia de un estrato resistente paralelo a la superficie del talud del ejercicio 2 incidió en que los resultados del método de ábacos fueran menos congruentes a Janbú simplificado; no obstante el modelo de falla es correcto porque el deslizamiento probable es extenso comparado con espesor y menor a la altura del talud (Suárez Díaz, 2009).

Los resultados obtenidos validaron lo planteado por Olivia (1999), Suárez Díaz (2009) y Duncan et al. (2014) quienes consideran preciso el análisis de talud infinito en suelos estratificados con materiales muy poco o nada cohesivos apoyados sobre algún elemento geológico paralelo a la superficie del talud como una capa de roca o estratos más resistente a escasa profundidad. Finalmente, como se muestra en la tabla 10, el uso de los ábacos puede ser extendido a análisis con esfuerzos totales en taludes totalmente secos sin alterar la fiabilidad de sus resultados.

Tabla 10. Factores de seguridad por talud Infinito

Método	Parámetros	Ejercicio 1	Ejercicio 2	Ejercicio 3
Talud infinito	Totales	1.118	0.911	0.65
	Efectivos	1.055	0.955	0.869
Janbú simplificado	Totales	1.060	0.838	0.652

Fuente: La autora

Elaboración: La autora

Comparativa entre métodos de dovelas (manual).

Los métodos de dovelas (Bishop simplificado, Janbú simplificado y Spencer) admiten su aplicación en taludes heterogéneos con superficie irregular; en el análisis de estabilidad no fue necesario adaptar las condiciones reales de los ejercicios a modelos simplificados. Las superficies críticas de rotura obtenidas difirieron en la mayoría de casos analizados con variación máxima de 6.2 % en los factores de seguridad FS calculados.

- *Bishop simplificado vs Spencer.*

El método de Spencer se considera como riguroso y completo porque satisface todas las condiciones de equilibrio estático asumiendo la resultante con inclinación constante (Θ) a lo largo de la masa; en cambio, Bishop simplificado asume la resultante con inclinación horizontal e ignora el cortante y el equilibrio de fuerzas horizontales. Ambas metodologías analizan superficies circulares de falla.

Los resultados de Spencer (figuras 14 y 15) muestran que las fuerzas cortantes e inclinación (Θ) asumida de la resultante no influyó considerablemente los FS calculados por equilibrio de momentos (FS_m); al contrario los FS por equilibrio de fuerzas (FS_f) fueron altamente susceptibles a la variación de Θ . Sin embargo, Krahn (2003) demostró lo siguiente:

- En taludes finitos con superficies de rotura planas el FS_m es dependiente de las fuerzas cortantes y Θ ; situación inversa ocurre con el FS_f .
- En taludes con superficies de rotura compuestas, cuñas o bloques, los FS_m y FS_f son completamente dependientes de las fuerzas cortantes y Θ .

En todos los análisis los FS obtenidos por ambos métodos fueron cuasi exactos (variación máxima de 0.6 %); esto ratifica las investigaciones de Fredlund y Krahn (1977) quienes plantearon que el FS calculado por Bishop simplificado varía alrededor del 5 % de Spencer o Morgenstern-Price.

Lo expuesto permite inferir que en análisis de taludes con combinaciones de arenas, limos y arcillas cuya rotura sea por fallas circulares o deslizamientos superficiales planares, Bishop simplificado es adecuado pues las hipótesis de fuerza cortante o su inclinación son irrelevantes mientras se considere el equilibrio de momentos. Respecto al tiempo invertido en el análisis, Bishop simplificado aventajó a Spencer por la rápida convergencia del FS en todos los ejercicios. Pese a ello, Alva Hurtado (1994) y Koutnik, Wei, y Singh (2008) expresan que en taludes con estratigrafías complicadas o superficies de falla cuasi verticales, Bishop simplificado es inestable numéricamente mientras Spencer calcula FS más reales recomendándose su aplicación en dichos casos.

- ***Janbú simplificado vs Spencer.***

Janbú simplificado, a diferencia de Spencer, analiza cualquier superficie de falla. Su planteamiento matemático considera únicamente el equilibrio de fuerzas, ignora la fuerza cortante, asume inclinación constante de la resultante e incorpora los efectos de la heterogeneidad del suelo con el factor de corrección f_0 .

En los taludes con deslizamientos superficiales, Janbú simplificado sobreestimó hasta 6.2 % los FS calculados respecto a Spencer; ello discrepó de Abramson, Lee, Sharma, y Boyce, (1996) quienes sugieren que en fallas no circulares el método es conservador. Además corroboró la aplicabilidad de Spencer en el cálculo de superficies de falla no circulares (USACE, 2003).

Freddlund y Krahn (1997) y Krahn (2003) expresan que Janbú en superficies curvas subestima el FS con variación máxima de 30 % respecto a métodos precisos porque el equilibrio de fuerzas es dependiente de la fuerza cortante. Sin embargo, en los taludes con deslizamientos circulares profundos Janbú simplificado dio FS menores en hasta 3.4 % comparado a Spencer; ello se atribuye al factor de corrección f_0 que incorpora los efectos de cortantes entre dovelas. Estos resultados concuerdan con las investigaciones de Aguilar Goenaga y Zúñiga Romero, (2015) y Rivas Salazar, (2007).

Finalmente se destaca que Janbú simplificado converge con mayor cercanía a Spencer en masas de falla planas o tipo cuñas porque bajo dichas condiciones FS por equilibrio de fuerzas es independiente de las fuerzas cortantes e inclinación asumida de la resultante (Θ) (Koutnik et al., 2008 y Krahn, 2003).

Comparativa del método FEM y métodos de equilibrio límite LEM.

A diferencia de los métodos LEM, el modelo de cálculo FEM idealiza suelo lineal elástico-plástico perfecto bajo el criterio de rotura de Mohr Coulomb (Hammah et al., 2005 citado por Wei, Koutnik, y Woodward, 2010) y solicita como variables de entrada los módulos de

deformación de Young (E) y Poisson (ν) (valores empíricos asociados al tipo de suelo y sus esfuerzos).

Durante el análisis se examinó la sensibilidad de los factores de seguridad FS a la variación de los parámetros de deformación; se corroboró la afirmación de Duncan et al. (2014) quien menciona que los métodos FEM generan resultados adecuados asumiendo valores $\Psi = 0$; $E = 10^5$ kPa y $\nu=0.3$ cuando no se disponga de información precisa.

En todos los taludes evaluados, las zonas de concentración de esfuerzos y deformaciones del análisis FEM concuerdan razonablemente con los círculos críticos de falla encontrados por métodos de dovelas (LEM). La diferencia entre los factores de seguridad FS calculados no excedió el 3.4 % y 6.4 % en comparación a Spencer y Janbú simplificado respectivamente, a excepción del ejercicio 2 donde sobredimensionó el FS en 12.4 % y 9.9 %. Estos resultados corroboran la investigación de Wrigth (1973) citado por IGME (1987) quién obtuvo dispersiones no superiores a 8 % entre ambas metodologías.

En el ejercicio 5 el análisis FEM permitió identificar dos zonas de concentraciones de vectores de deformación (corona y pie). El estrato 3 (limos de alta plasticidad) fue un plano crítico de debilidad, condicionó notablemente la estabilidad por su potencia relativamente pequeña respecto a la altura del talud y elevada cohesión ($c=81.4$ kPa); en consecuencia se usó durante la modelación un mayor número de elementos (mallado) que incluya el equilibrio de esfuerzos y deformaciones en todos los puntos críticos según lo recomendado por Y.M Cheng (2003). Se observó que la densidad del mallado es directamente proporcional al tiempo y memoria de procesamiento del computador requerido en el análisis.

Lo expuesto sugiere que el uso a priori de métodos FEM no se justifica pues los FS calculados con ambas metodologías convergen satisfactoriamente. Inclusive ábacos, como Talud infinito, otorgaron resultados valederos al modelar adecuadamente la superficie de falla con simplificaciones realistas de sus características geométricas y geomecánicas.

Sin embargo, Rabie (2014) sugiere el uso de métodos FEM en el análisis de taludes bajo el efecto de lluvias intensas porque generalmente las metodologías LEM incurren en FS altamente conservadores. De igual forma, Krahn (2003) recomienda analizar mediante FEM taludes verticales con algún tipo de refuerzo que den lugar a concentraciones de esfuerzos en la potencial masa de falla o cuando se sospeche la presencia de zonas de ruptura adicionales como lo suscitado en el ejercicio 5.

CONCLUSIONES

Luego de la caracterización geomecánica con base a ensayos de laboratorio correspondientes a los suelos de las zonas seleccionadas, la determinación de perfiles topográficos representativos de los taludes y el análisis de estabilidad con ábacos, métodos de dovelas (equilibrio límite LEM) y metodologías tensodeformacionales (elementos finitos FEM), se han establecido las siguientes conclusiones:

- El número de muestras recuperadas debe ser representativo de los taludes evaluados y fundamentado en la exploración de campo sin afectar la factibilidad económica del proyecto.
- Los métodos LEM reflejan adecuadamente la estabilidad de los taludes analizados; sin embargo, la selección del método de cálculo adecuado en un análisis de estabilidad debe partir de la comprensión de sus hipótesis, capacidades y limitantes. El discernimiento del FS que concuerde adecuadamente con la realidad visualizada en campo queda a juicio del ingeniero geotécnico.
- Los taludes cuyos estratos buzcan en dirección aproximadamente cercana al buzamiento del perfil topográfico son menos estables ($FS < 1$); situación contraria ocurre cuando los estratos buzcan en sentido opuesto a la inclinación de la superficie del talud ($FS > 1$). Cabe destacar que las propiedades de resistencia al corte del suelo y nivel freático son otras condicionantes fundamentales en la estabilidad, además en evaluaciones de taludes en roca influye considerablemente la presencia de discontinuidades, juntas, foliaciones, entre otras.
- Los ábacos de Hoek y Bray dan FS mayores en el rango de 20 % a 68 % respecto a Bishop simplificado en deslizamientos superficiales planares mientras que en fallas por círculos profundos subestiman la estabilidad entre 20 % y 34 %. Estos resultados son exclusivos de la investigación por las modificaciones efectuadas a los taludes analizados previo al uso de la metodología.
- Los ábacos de Taylor sobrestiman el FS respecto a métodos precisos como Spencer entre 19 % y 73 % por el ajuste realizado al buzamiento y parámetros de resistencia al corte de los taludes evaluados. Sin embargo, cuando las propiedades geotécnicas equivalentes se adaptan a las condicionantes establecidas por el método, la variación del FS puede llegar a 3.9 % como se evidenció en el ejercicio 5.
- Los ábacos de talud infinito pueden considerarse adecuados en análisis preliminares de suelos estratificados con materiales poco o nada cohesivos apoyados sobre estratos más resistentes porque sobreestimaron en máximo 8.7 % el FS en

comparación a métodos de dovelas; resultados que son congruentes a las investigaciones de Olivia (1999), Suárez Díaz (2009) y Duncan et al. (2014).

- La dispersión máxima de los FS calculados por métodos de dovelas (6.2 %) se aproxima a resultados de investigaciones actualizadas como Duncan et al. (2014), Lau y Cheng (2008) y Wei et al. (2010).
- La incidencia de las hipótesis asumidas en los métodos de dovelas está ligado a la forma de superficie de rotura. En taludes con fallas superficiales planares asociados a talud infinito y círculos profundos, los FS calculados por Bishop simplificado se aproximan a métodos que satisfacen todo el equilibrio estático como Spencer (variación máxima de 0.6%). Este escenario no se cumple en superficies de rotura compuestas, cuñas y bloques donde el equilibrio de fuerzas es el principal condicionante de la estabilidad como lo expone Krahn (2003).
- Janbú simplificado sobreestima en máximo 6.2 % los FS calculados respecto a Spencer en deslizamientos superficiales planares y da resultados hasta 3.4 % menores en roturas por círculos profundos. En fallas tipo cuñas, Janbú simplificado converge con mayor cercanía a Spencer; estos resultados concuerdan a las investigaciones de Aguilar y Zúñiga (2015), Krahn (2003) y Rivas (2007).
- El análisis de estabilidad con el software Slide, que emplea métodos de equilibrio límite, posibilita al usuario la generación de un mallado automático para la búsqueda de círculos probables de falla. Sin embargo, sus límites deben refinarse en función del reconocimiento visual en campo de indicios de rotura (geometría y tipo de movimiento de masa) en los taludes evaluados.
- En taludes de geometría sencilla con superficies de falla circular los métodos LEM difieren en máximo 12.4 % de análisis FEM, lo cual concuerda con resultados del IGME (1987).

RECOMENDACIONES

- Durante la etapa de exploración y muestreo se recomienda considerar como principal criterio de extracción la heterogeneidad de los materiales, identificando los estratos que probablemente sean más influyentes en la estabilidad (Blake et al., 2002).
- Para la selección de los métodos de cálculo de estabilidad que mejor se adapten a los taludes evaluados, se recomienda realizar una comparativa entre los criterios de análisis de cada metodología y las características principales (buzamiento, componentes geológicos, presencia de nivel freático, erosión, meteorización, mecanismos de falla) visualizadas en campo.
- Todos los métodos son adecuados si se consideran sus condicionantes; la dispersión de los resultados obtenidos por ábacos y tablas de la investigación no invalida su aplicación porque ofrece aproximaciones adecuadas de la estabilidad mientras los taludes cumplan sus solicitudes establecidas.
- En taludes con estratigrafías complicadas o superficies de falla aproximadamente verticales se recomienda usar métodos de equilibrio límite que cumplan todas las ecuaciones de equilibrio estático como Spencer o Morgenstern-Price.
- El uso prioritario de métodos de elementos finitos (FEM) se recomienda en modelos donde la superficie potencial de falla tenga formas irregulares como esquinas angulares u otras zonas de concentración de esfuerzos.
- Tras el análisis de estabilidad manual o en software se debe verificar que los resultados sean acordes a lo visualizado en campo, de no ser así se recomienda comprobar los datos de entrada como topografía y representatividad de las propiedades de resistencia al corte del talud.
- Para generalizar los resultados encontrados en el presente proyecto se recomienda investigaciones adicionales que involucren mayor diversidad en los casos de estudio analizados.

BIBLIOGRAFÍA

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., y Boyce, G. M. (1996). *Slope stability and stabilization methods*. New York: John Wiley & Sons.
- Aguilar Goenaga, O. A., y Zúñiga Romero, C. E. (2015). *Análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite aplicado a taludes o laderas aledañas al cerro de La Popa, casco urbano de Cartagena*. Tesis de pregrado, Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería, Cartagena.
- Alcántara, I., Echavarría, A., Gutiérrez, C., Domínguez, L., y Noriega, I. (2001). *Inestabilidad de laderas* (Segunda ed.). (D. Vázquez Sánchez, Ed.) México D.F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Alva Hurtado, J. E. (1994). *Notas sobre análisis de estabilidad de taludes*. Documento no publicado, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. Recuperado de http://www.jorgealvahurtado.com/files/labgeo02_a.pdf
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2002). *Recommended procedures for implementation of DMG special publication 117 guidelines for analyzing and mitigating landslide hazards in California*. Geotechnical Engineering Group. California: Southern California Earthquake Center.
- Bermeo Castillo, M., & Bustamente Rodríguez, T. (2011). *Propuesta metodológica para análisis y evaluación de taludes mediante monitoreo y modelación*. Tesis de pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja.
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Blake, T. F., Hollingsworth, R. A., y Stewart, J. P. (June de 2002). Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117 Guidelines for Analyzing and Mitigating Landslide Hazards in California. ASCE Los Angeles Section Geotechnical Group.
- Braja M, D. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (Primera ed.). México: Cengage Learning Latin Am.
- Cornforth, D. (2005). *Landslides in Practice*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- Duncan, J. M. (1996). State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(7), 577-597.

- Duncan, J. M., Wright, S., y Brandon, T. (2014). *Soil strength and slope stability* (Segunda ed.). New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Esparza Villalba, C. A. (2009). *Guía didáctica de Geotecnia*. Manuscrito no publicado. Obtenido de <https://es.scrib.com/document/224444437/Guia-Parte-i-de-Geotecnia-2009>
- Espinoza, C., y Tapia, L. (2013). *Análisis comparativo entre los métodos de estabilidad de taludes aplicados a las presas de tierra del proyecto PACALORI*. Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca, Escuela de Ingeniería Civil, Cuenca.
- Fellenius, W. (1927). Cálculos estadísticos con la fricción y la cohesión (adhesión), y asumiendo rotura circular en superficies deslizantes cilíndricos. Berlín: Emst & Sohn.
- Fredlund, D. G., y Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnical Journal*(14), 429-439.
- Geotechnical Engineering Office. (2011). *Geotechnical manual for slopes* (Segunda ed.). Hong Kong: Homantin (Trabajo original publicado en 1984).
- Gerscovich, D. (2015). *Estabilidad de taludes*. (M. García, Trad.) Bogotá, Colombia: Lemoine Editores.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- González, J., y León, A. (2013). *Análisis cuantitativo de la estabilidad en taludes y laderas*. Tesis de pregrado, Universidad de las Californias Internacional, Tijuana, Baja California.
- Hoek, E., y Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering*. Londres: Institute of Mining and Met.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (1986). *Manual de taludes*.
- Jiménez Salas, J. A. (1980). *Geotecnia y cimientos III Cimentaciones y excavaciones de la geotecnia* (Primera ed.). Madrid: MMadrid:Rueda.
- Koutnik, T., Wei, L., y Singh, J. (2008). A case study of safety factor comparison of different slope stability methods for levee design in New Orleans. *GeoCongress 2008*, 499-506.
- Krahn, J. (2003). The 2001 R.M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses. *Canadian Geotechnical Journal*(40), 643-660. doi:10.1139/T03-024
- Lau, C. K., y Cheng, Y. M. (2008). *Slope stability analysis and stabilization. New methods and insight*. New York, USA: Routledge Taylor & Francis Group. doi:10.1201/b17015

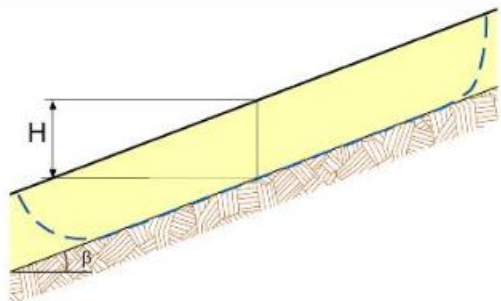
- Marín Rodríguez, G. P., & Quintero Díaz, L. K. (2008). *Manual con ejercicios para la modelación matemática y numérica de la estabilidad de taludes*. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil, Bucaramanga.
- Melentijevic, S. (2005). *Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería y Morforlogía del Terreno, Madrid.
- Morgenstern, N. R., y Price, V. E. (1965). The analysis of stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79-93.
- Olivia, A. O. (1999). *Análisis de la estabilidad y seguridad de taludes*. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, Departamento de Explotación y Prospección de minas, España.
- Ortuño Abad, L., Uriel y Asociados, S. A., y Prof. Asociado. ETSICCP, U. (2004). *Curso de Geotecnia para Infraestructuras*. Sevilla. Recuperado de <http://www.urielyasociados.es/img/formacion/ponencia4.pdf>
- Pérez de Agreda, E. A. (2005). *Estabilidad de taludes*. Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica E.T.S. d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports, Catalunya.
- Pulecio Díaz, J. A. (2015). *Unidad 1. Tipología obras de drenaje y subdrenaje en vías. (Documento de docencia No. 6)*. Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/greylit.1198>
- Rabie, M. (2014). Comparison study between traditional and finite element methods for slopes under heavy rainfall. *Housing and Building National Research Center Journal*, 160-168. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.10.002>
- Rivas Salazar, J. A. (2007). *Comparación de los métodos de análisis de estabilidad de taludes (Bishop y Janbú) en suelos arenosos en el km 9+000 para la línea de conducción del plan maestro de agua potable para Loja*. Tesis de pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja, Escuela de Ingeniería Civil, Loja.
- Sanhueza Plaza, C., y Rodríguez Cifuentes, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la construcción*, 17-29. doi:10.4067/S0718-915X2013000100003
- Spencer, E. A. (1967). Method of tension on stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique*, 17(1), 11-26.

- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Bucaramanga: Publicaciones UIS.
- Suárez Díaz, J. (2009). *Análisis geotécnico*. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Bucaramanga: Publicaciones UIS.
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- US Army Corps of Engineers (USACE). (2003). EM 1110-2-1902. *Engineering and desing. Slope stability*. Washington, DC: Department of the Army. Recuperado de <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/>
- Wei, L., Koutnik, T., y Woodward, M. (2010). A slope stability case study by limit equilibrium and finite element methods. *GeoFlorida 2010: Advances in analysis, modeling & desing*, 3090-3099.

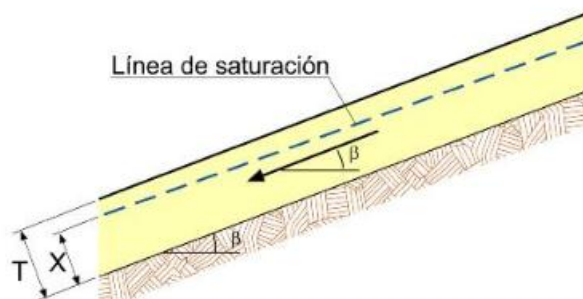
ANEXOS

Anexo A. Ábacos métodos de cálculo de estabilidad de taludes

Anexo A.1. Ábacos de talud infinito

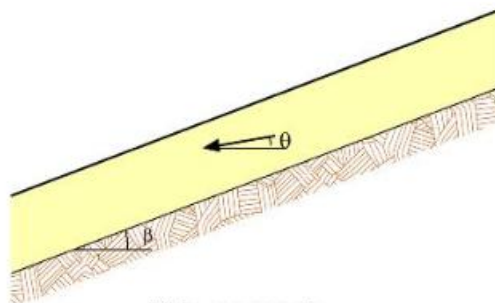


- γ = Peso específico aparente del suelo.
- γ_W = Peso específico aparente del agua.
- c' = Cohesión efectiva
- ϕ' = Angulo de rozamiento interno efectivo.
- $r_u = \frac{u}{\gamma H}$
- u = Presión intersticial a profundidad H.



Flujo paralelo al talud

$$r_u = \frac{X}{T} \frac{\gamma_W}{\gamma} \cos^2 \beta$$

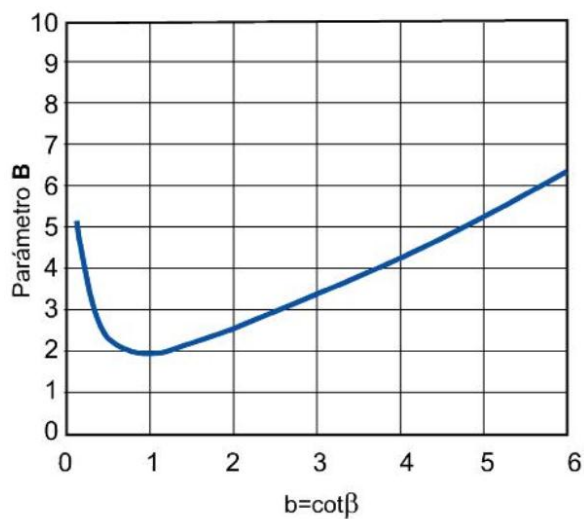
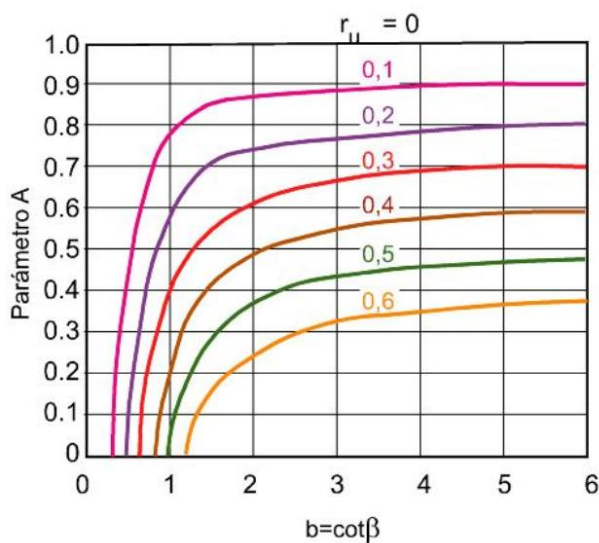


Flujo emergente.

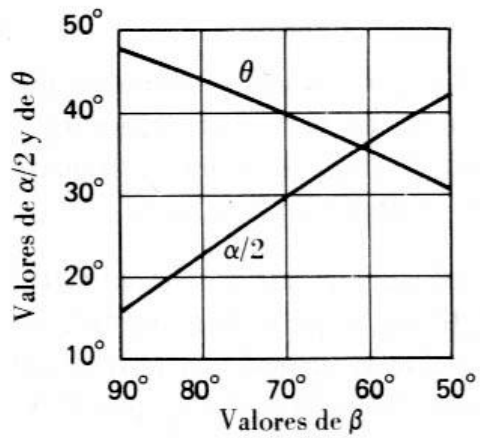
$$r_u = \frac{\gamma_W}{\gamma} \frac{l}{l + \tan \beta \tan \theta}$$

Proceso:

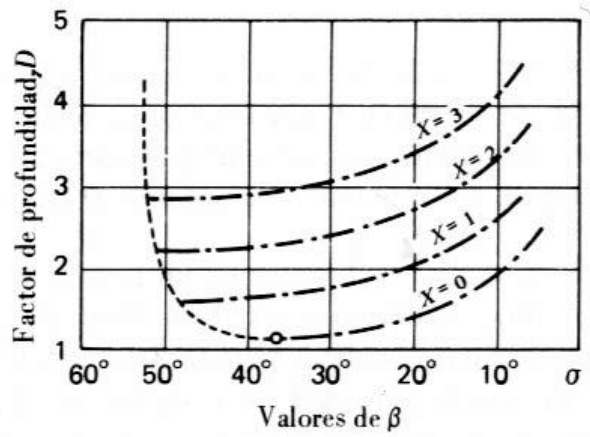
- ① Obtención de r_u
- ② Determinación de A y B a partir de los ábacos.
- ③ Cálculo de $F = A \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + B \frac{c'}{\gamma H}$



Fuente: Soriano, A (1977), tomado de Ortuño Abad et al. (2004)



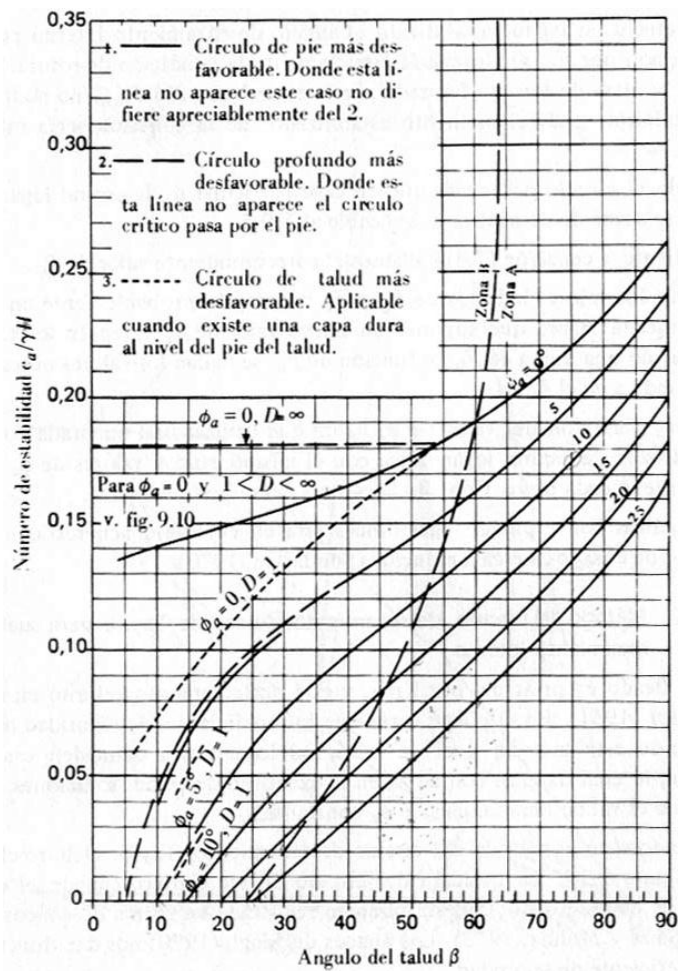
(b)



(c)

Fuente: Jiménez Salas, J.A. et al. (1976), tomado de Ortuño Abad et al. (2004)

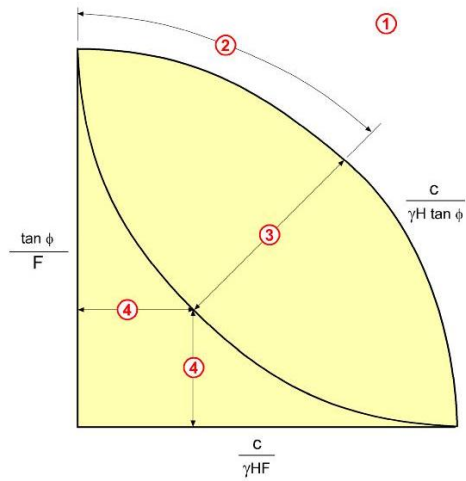
➤ **Terrenos homogéneos con cohesión y rozamiento.**



Fuente: Jiménez Salas, J.A. et al. (1976), tomado de Ortuño Abad et al. (2004)

Anexo A.3. Ábacos de Hoek y Bray

1. Procedimiento para determinar el coeficiente de seguridad de un talud



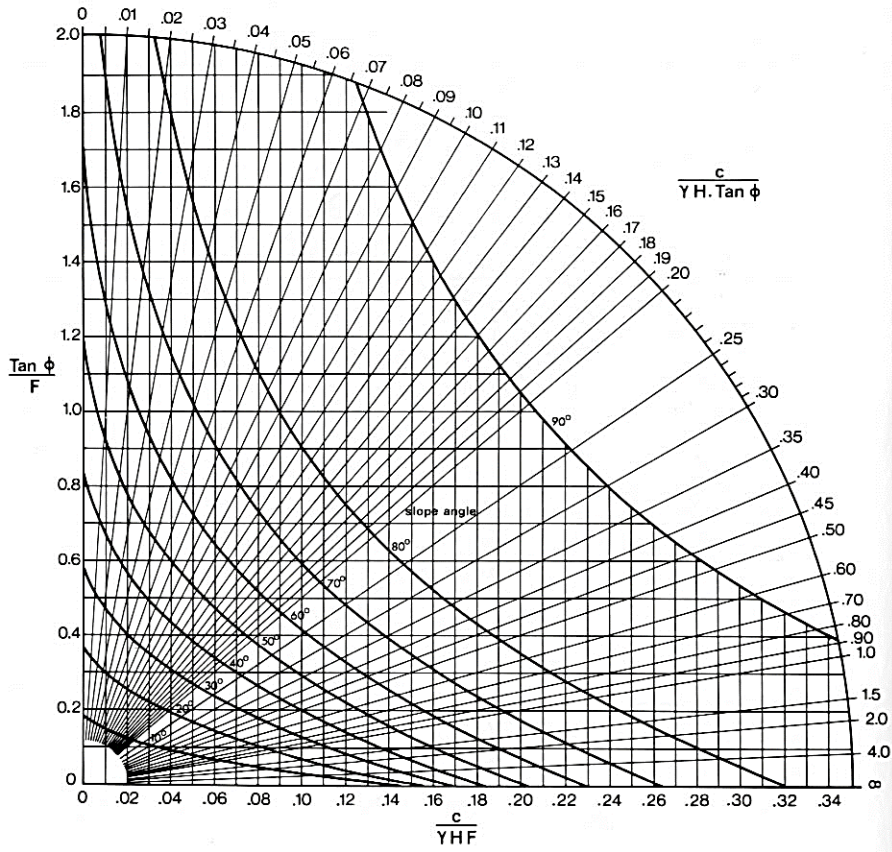
Fuente: Hoek y Bray, (1981), tomado de Ortuño Abad et al. (2004)

2. Identificación de condiciones de flujo de agua y presión intersticial para selección del ábaco o carta correspondiente.

GROUNDWATER FLOW CONDITIONS	CHART NUMBERS
FULLY DRAINED SLOPE	1
SURFACE WATER 8 X SLOPE HEIGHT BEHIND TOE OF SLOPE	2
SURFACE WATER 4 X SLOPE HEIGHT BEHIND TOE OF SLOPE	3
SURFACE WATER 2 X SLOPE HEIGHT BEHIND TOE OF SLOPE	4
SATURATED SLOPE SUBJECT TO HEAVY SURFACE RECHARGE	5

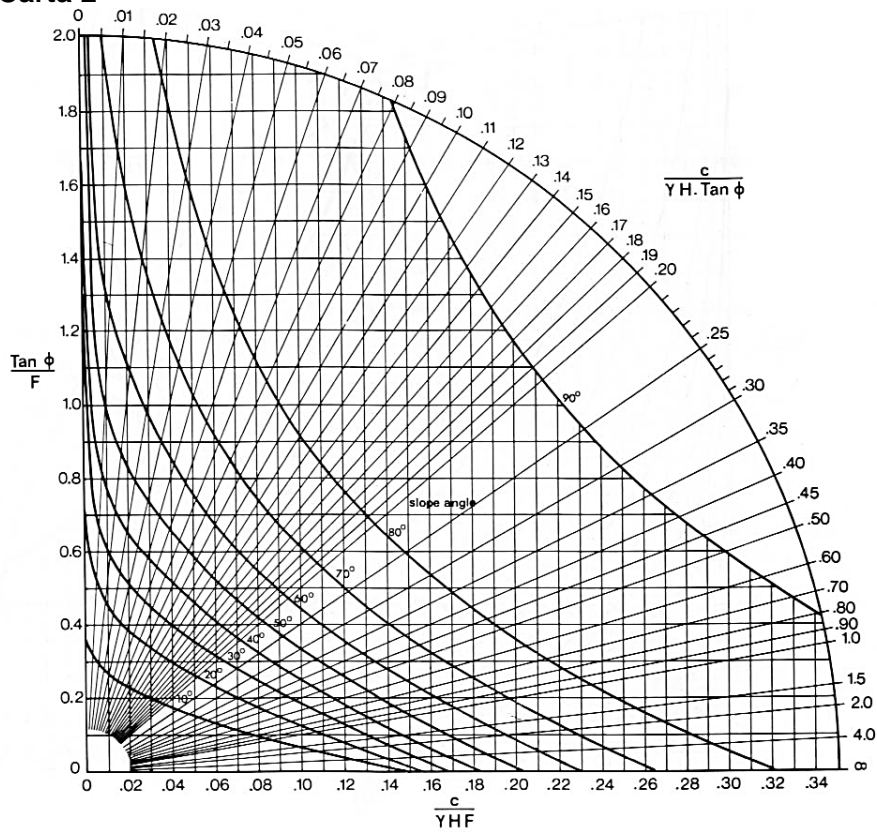
Fuente: Hoek y Bray, (1981), tomado de Ortuño Abad et al. (2004)

2.1. Carta 1



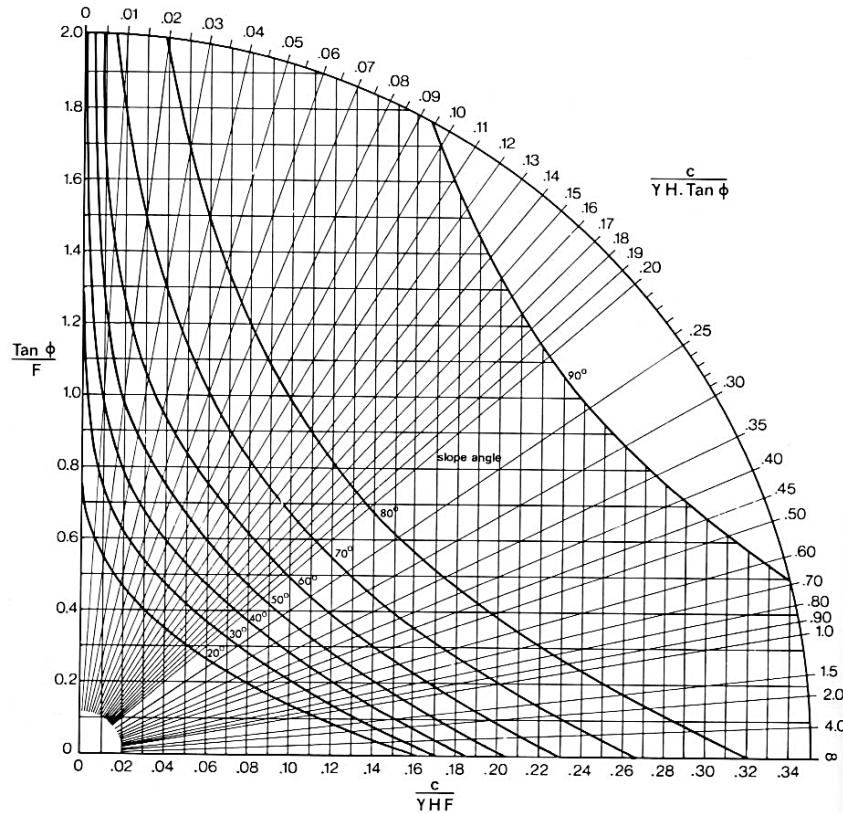
Fuente: Hoek y Bray, (1981), tomado de Ortuño Abad et al. (2004)

2.2. Carta 2



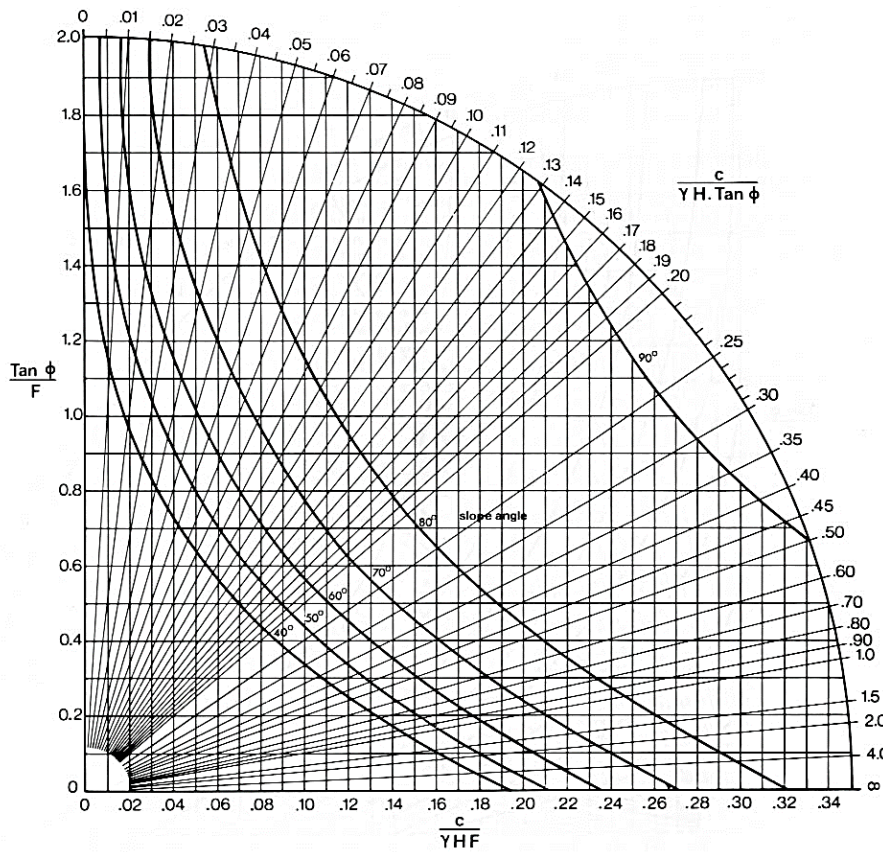
Fuente: Hoek y Bray, (1981), tomado de Ortuño Abad et al. (2004)

2.3. Carta 3



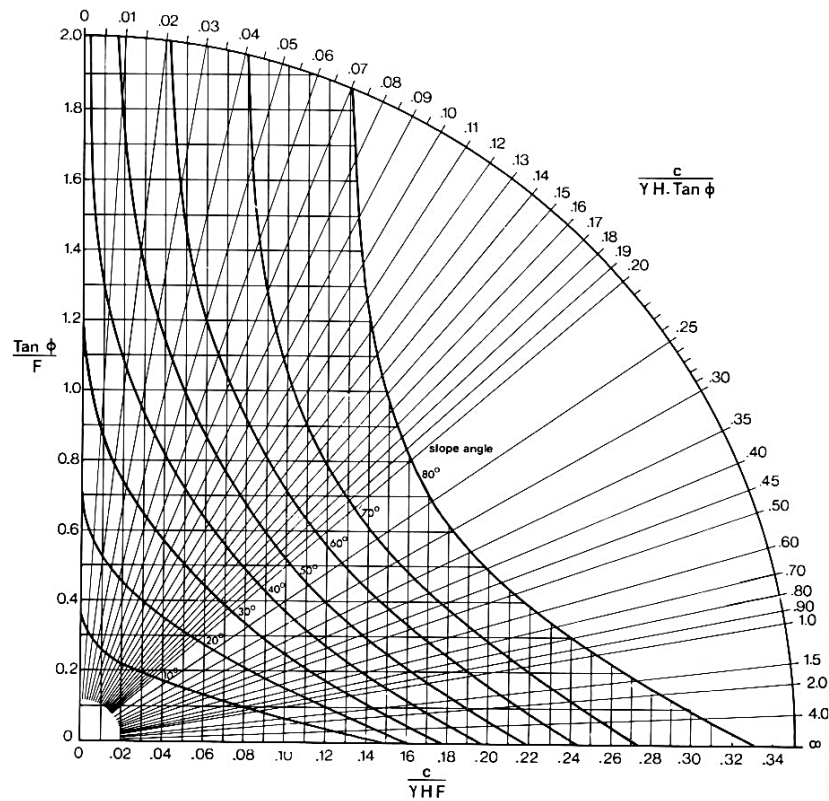
Fuente: Hoek y Bray, (1981), tomado de Ortuño Abad et al. (2004)

2.4. Carta 4



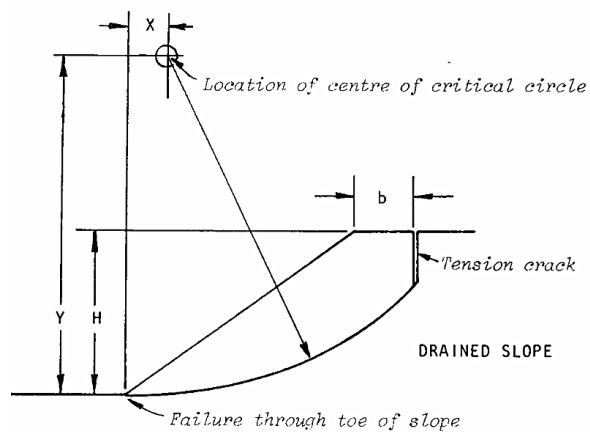
Fuente: Hoek y Bray, (1981), tomado de Ortuño Abad et al. (2004)

2.5. Carta 5

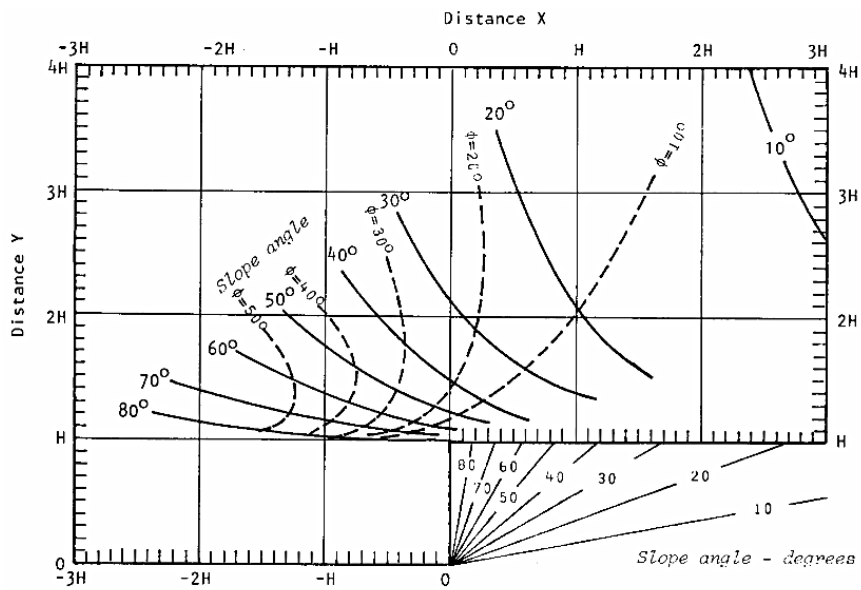


Fuente: Hoek y Bray, (1981), tomado de Ortuño Abad et al. (2004)

3. Localización de círculo crítico probable de falla y ubicación de grieta de tracción.

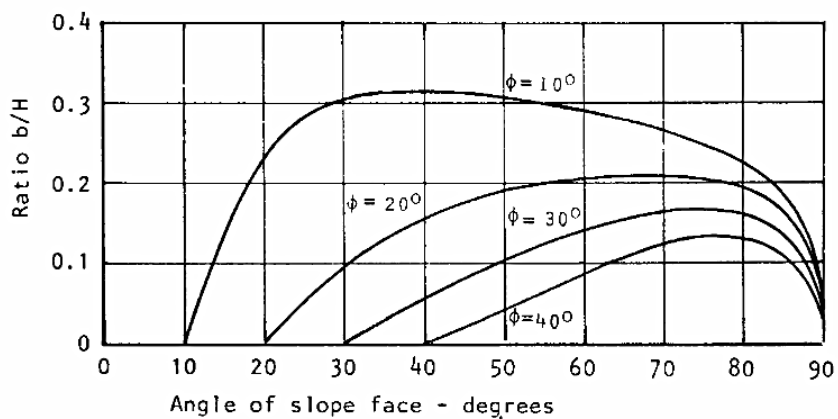


Fuente: Hoek y Bray, (1981), tomado de (Pérez de Agreda, 2005).



Location of centre of critical circle for failure through toe

Location of centre of critical circle for failure through toe



Location of critical tension crack position

Fuente: Hoek y Bray, (1981), tomado de (Pérez de Agrega, 2005)

Anexo B. Ejercicios planteados

Anexo C. Superficies de falla críticos

Anexo D. Cálculos métodos de dovelas.

Anexo D.1. Cálculos de ejercicio 1.

Anexo E. Modelaciones Método de Elementos Finitos (FEM)

Ejercicio 1

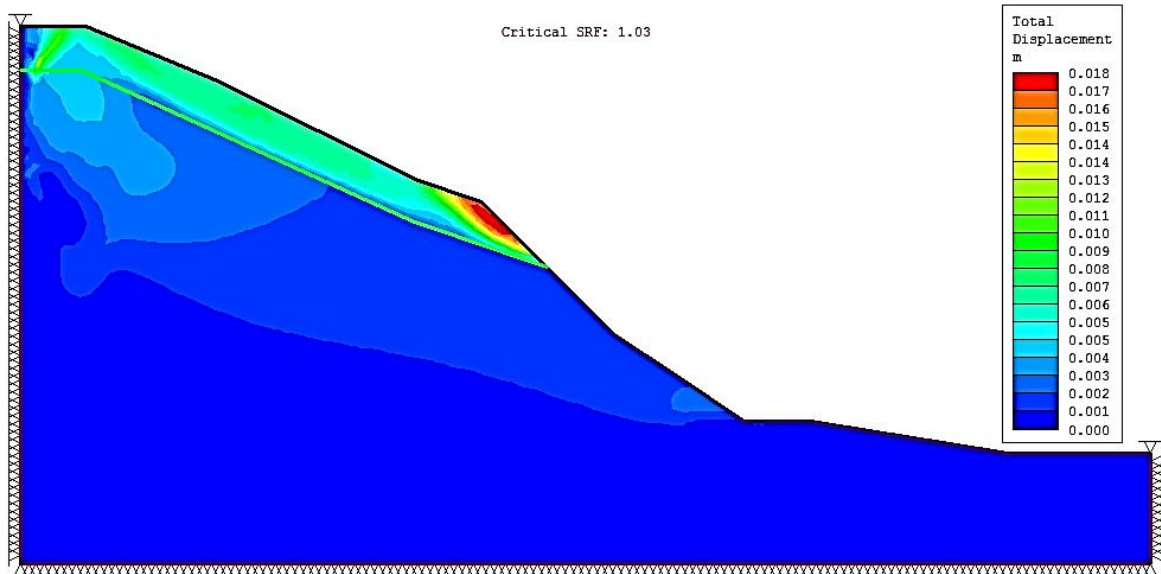


Figura E.1: Desplazamientos totales (matices), ejercicio 1

Fuente: Phase2 (versión de prueba)

Elaboración: La autora

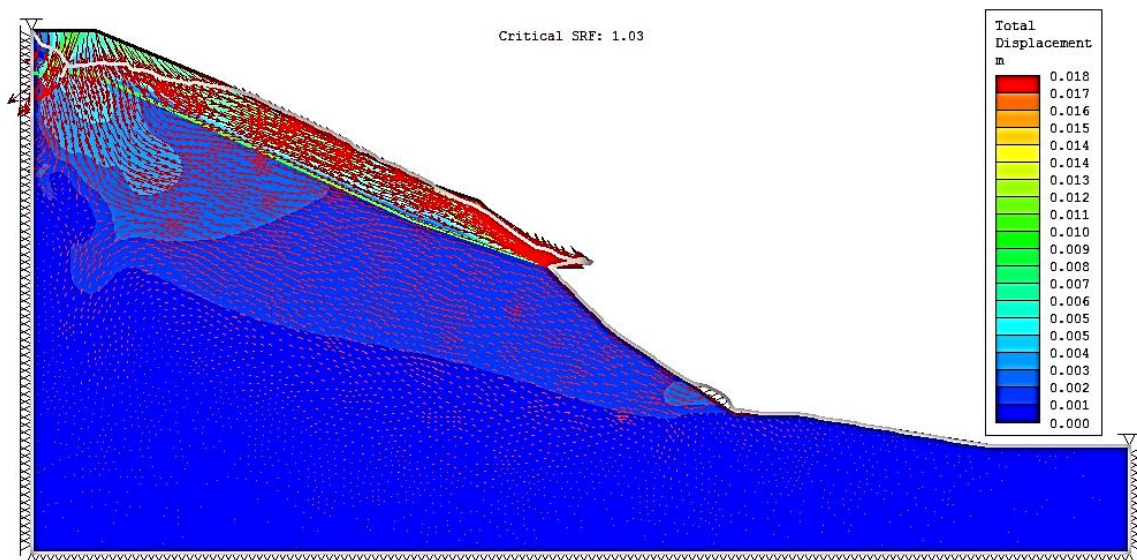


Figura E.2: Vectores de deformación, ejercicio 1

Fuente: Phase2 (versión de prueba)

Elaboración: La autora

Ejercicio 2

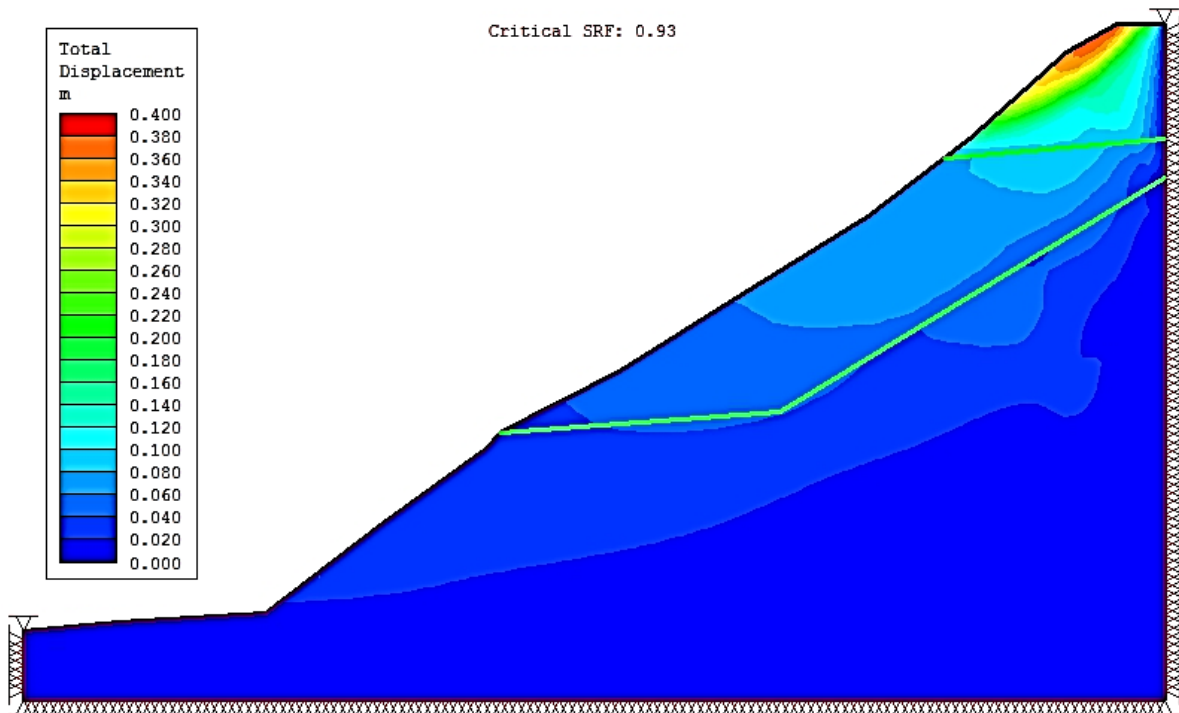


Figura E.3: Desplazamientos totales (matices), ejercicio 2

Fuente: Phase2 (versión de prueba)

Elaboración: La autora

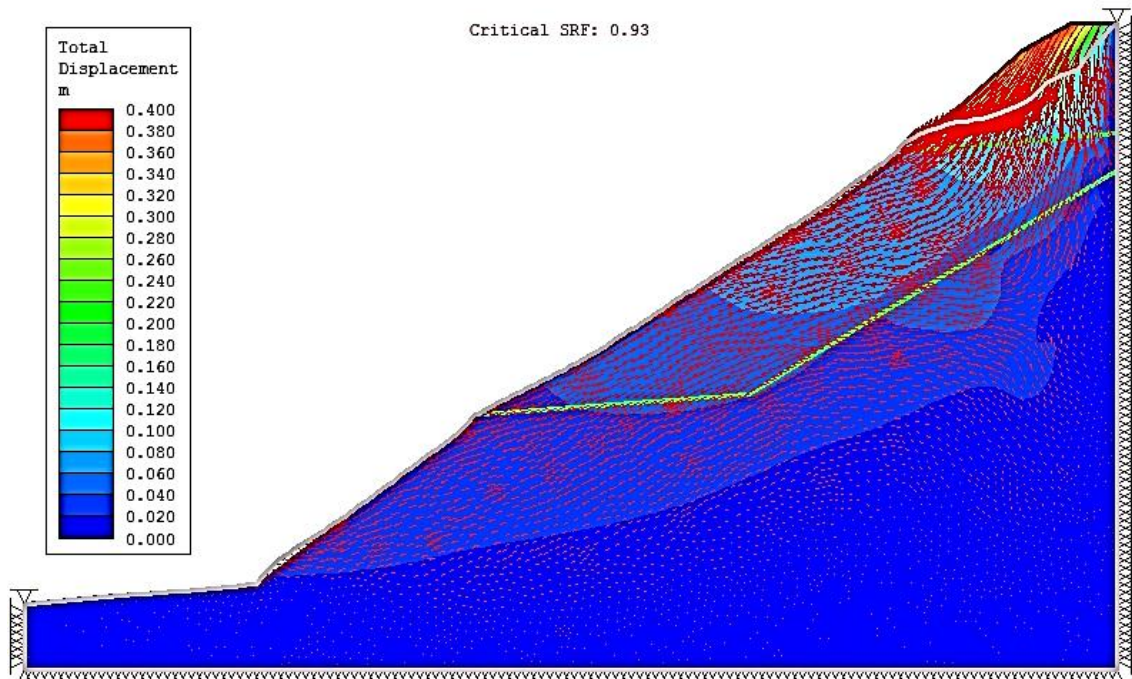


Figura E.4: Vectores de deformación, ejercicio 2

Fuente: Phase2 (versión de prueba)

Elaboración: La autora

Ejercicio 3

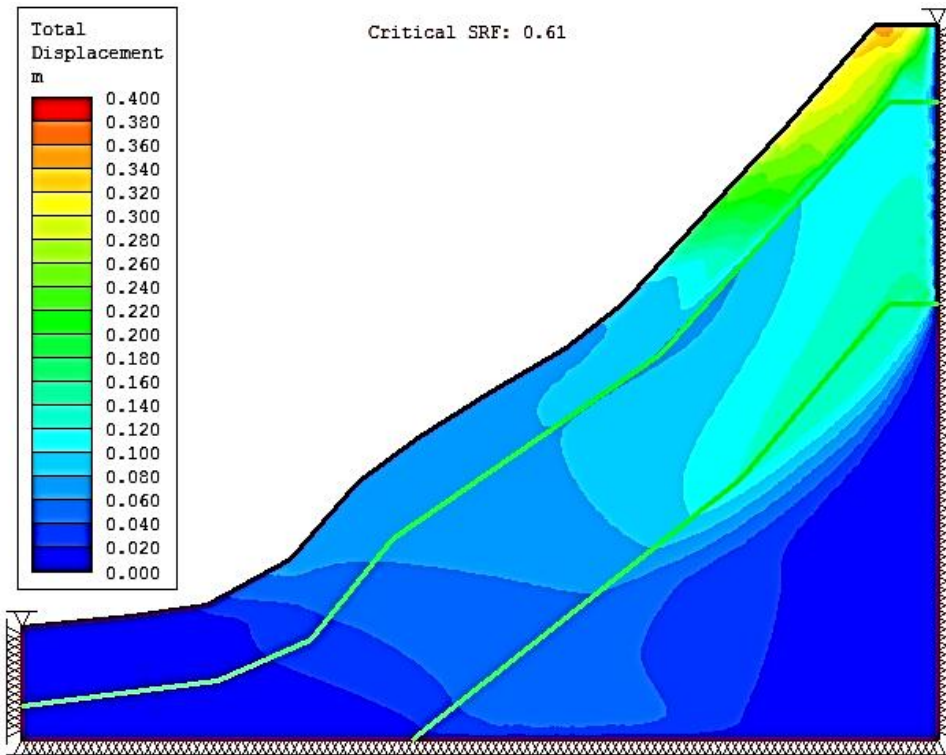


Figura E.5: Desplazamientos totales (matices), ejercicio 3

Fuente: Phase2 (versión de prueba)

Elaboración: La autora

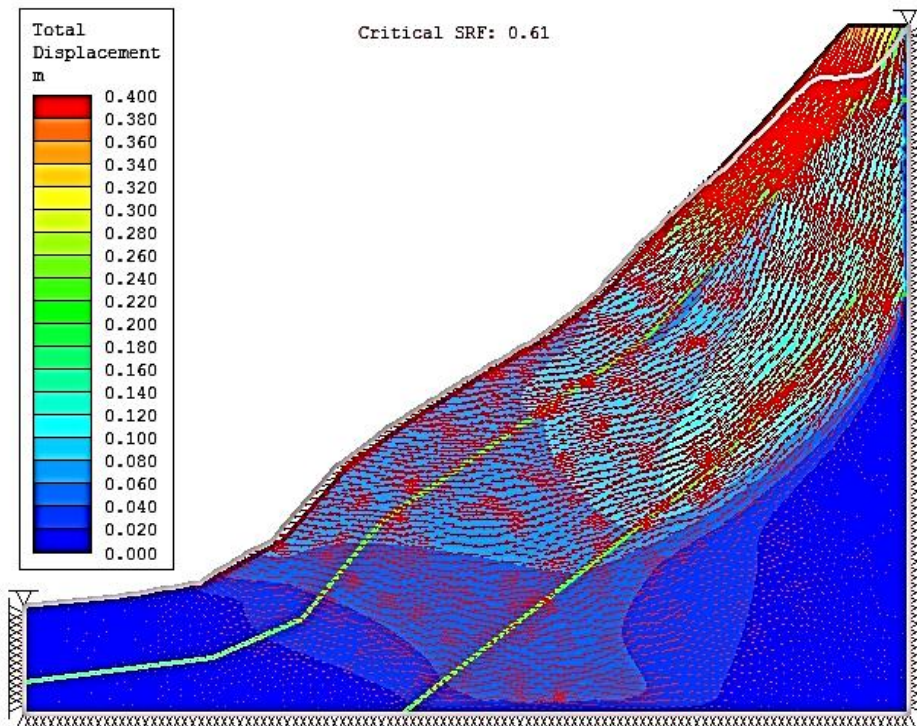


Figura E.6: Vectores de deformación, ejercicio 3

Fuente: Phase2 (versión de prueba)

Elaboración: La autora

Ejercicio 4

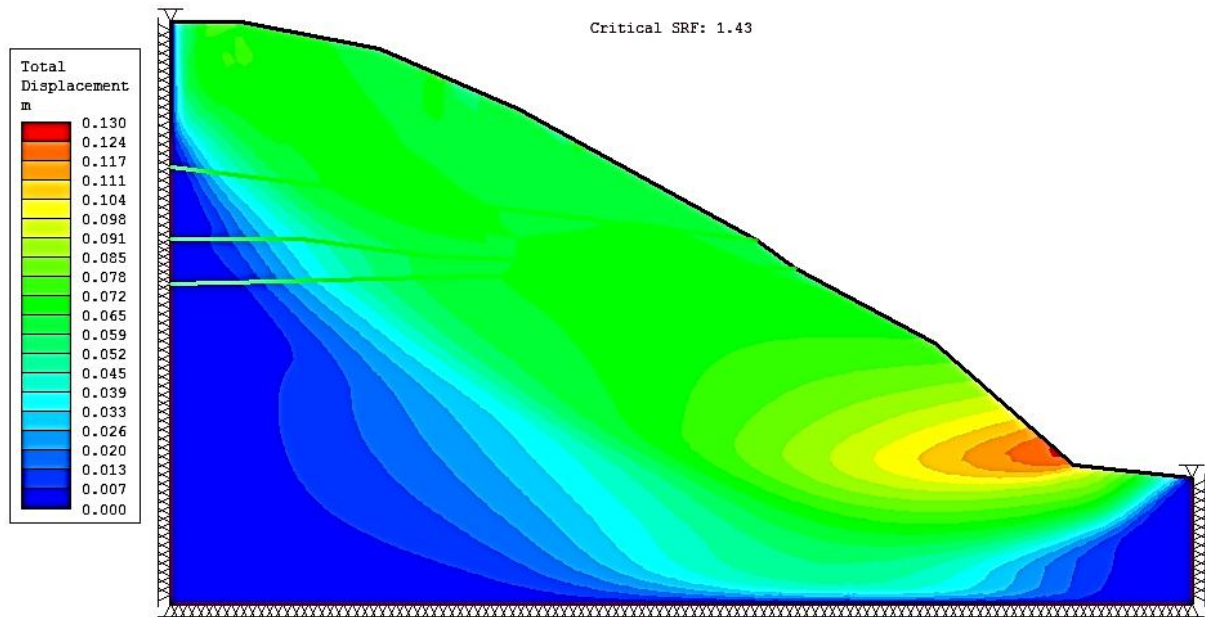


Figura E.7: Desplazamientos totales (matices), ejercicio 4

Fuente: Phase2 (versión de prueba)

Elaboración: La autora

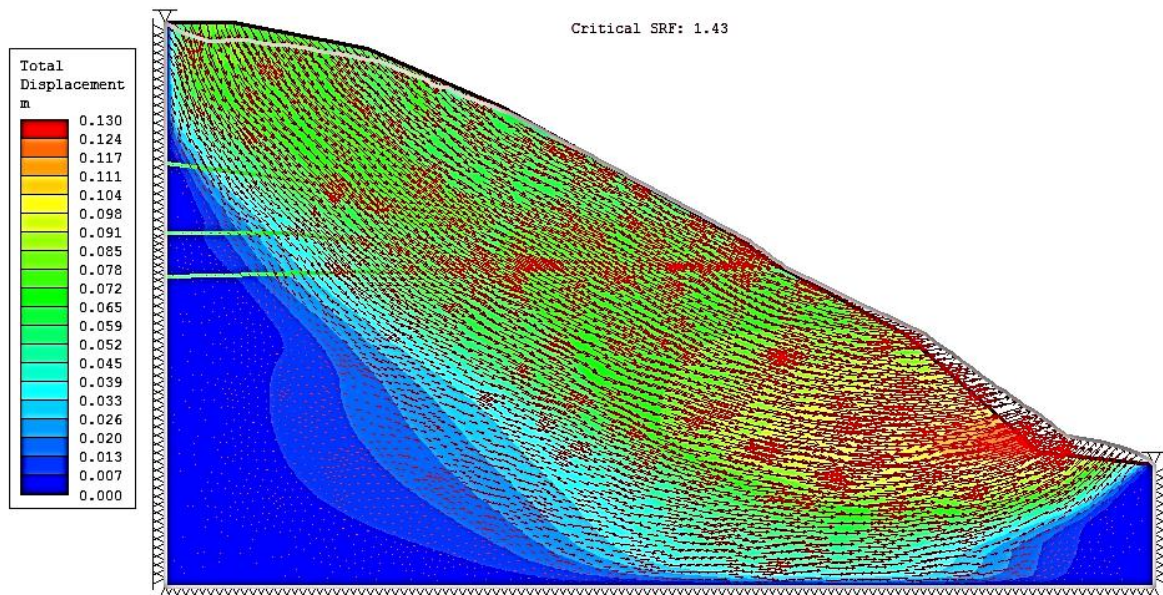


Figura E.8: Vectores de deformación, ejercicio 4

Fuente: Phase2 (versión de prueba)

Elaboración: La autora

Ejercicio 5

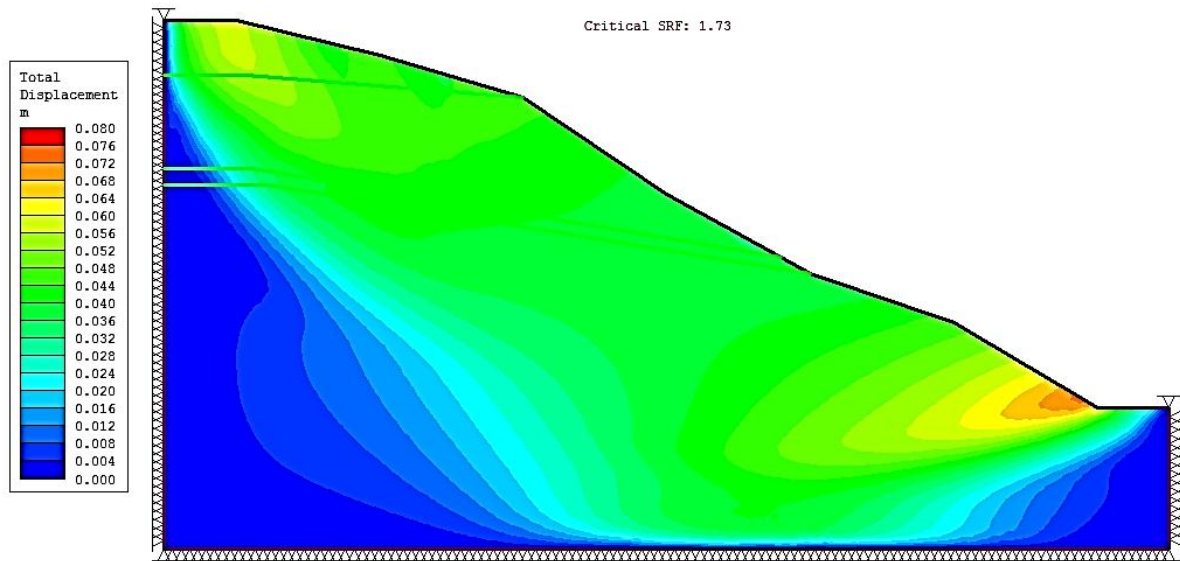


Figura E.9: Desplazamientos totales (matices), ejercicio 5

Fuente: Phase2 (versión de prueba)

Elaboración: La autora

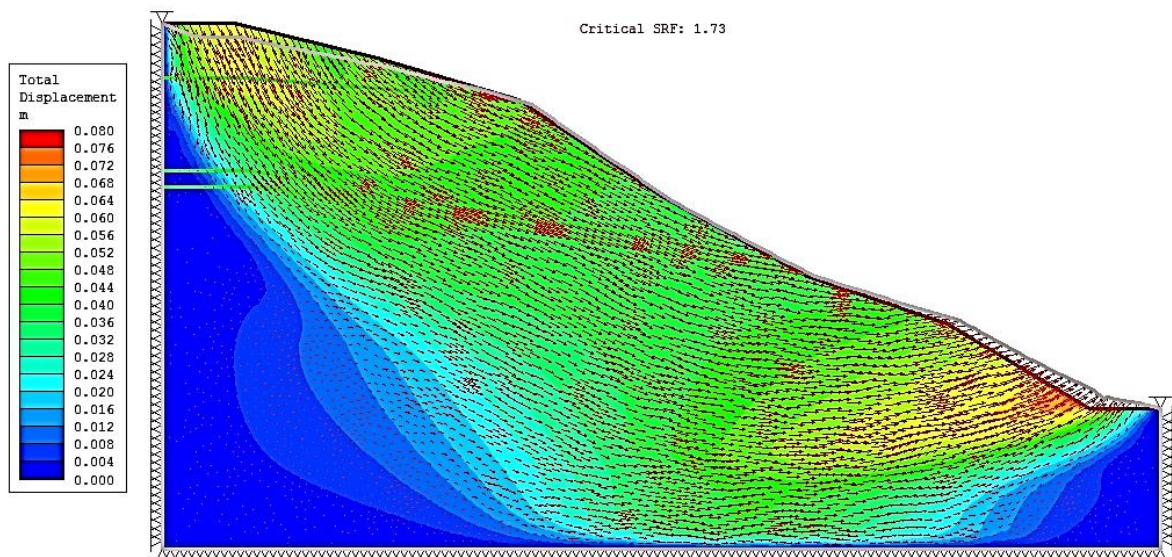


Figura E.10: Vectores de deformación, ejercicio 5

Fuente: Phase2 (versión de prueba)

Elaboración: La autora

Anexo F. Comparativa de hipótesis de diferentes métodos de cálculo de estabilidad.

Método	Tipo de análisis (Esfuerzos)	Superficie de falla	Equilibrio explícito			Análisis	Fuerzas entre dovelas		Inclinación fuerza entre dovelas	Adecuado para soluciones manuales
			<i>M</i>	<i>FH</i>	<i>FV</i>		<i>Normal</i>	<i>Cortante</i>		
Talud Infinito	Efectivos	Planar	No ²	Sí	Sí	Bloque rectangular	No	No	No aplica	Sí
Ábacos Hoek y Bray	Efectivos	Circular por pie	Sí	No	No	Bloque	No	No	No aplica	Sí
Ábacos de Taylor	Totales ¹	Circular	Sí	Sí	Sí	Bloque	No	No	No aplica	Sí
Bishop Simplificado	Cualquiera	Circular	Sí	No	Sí	Dovelas	Sí	No	Horizontal	Sí
Janbú Simplificado	Cualquiera	Arbitraria	No	Sí	Sí	Dovelas	Sí	No ³	Horizontal	Sí
Spencer	Cualquiera	Circular	Si	Si	Si	Dovelas	Sí	Sí	Constante	No
FEM	Cualquiera	Cualquiera	Esfuerzos y deformaciones			Elementos finitos (mallado)	No	No	No aplica	No

1 Se puede emplear esfuerzos efectivos si talud totalmente seco

2 Considera equilibrio de momentos indirectamente por ser las fuerzas colineales

3 Incorpora efectos de fuerza cortante con factor fo

Fuente: Jimenez Salas (1980) y González de Vallejo et al. (2002)

Elaboración: La autora