

MÉTODO DE PHI-C REDUCCIÓN

DAYARITH YOHANA NOVA BURGOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA FISICOMECÁNICAS
BUCARAMANGA**

2013

MÉTODO DE PHI-C REDUCCIÓN

DAYARITH YOHANA NOVA BURGOS

**Proyecto de grado para optar al título de
INGENIERA CIVIL**

DIRECTOR

HEBENLY CELIS LEGUIZAMO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA FISICOMECAÑICAS

BUCARAMANGA

2013

DEDICATORIA

A mis padres y a mi hermano porque es el motor de mi vida.

A Sergio Arguello, le agradezco por ser mi compañero y amigo

AGRADECIMIENTOS

- *A Dios, porque me dio la oportunidad de estudiar una carrera tan importante, porque no me dejó desfallecer y es mi guía ante la adversidad de la vida cotidiana y universitaria.*
- *A mis padres que si bien no conocieron el futuro de su hija, dejaron una formación integral, basada en la riqueza del estudio en el ser humano. Aunque le han hecho falta a mi vida pude lograrlo... los sigo amando y recordando ustedes fueron una gran motivación.*
- *A la universidad y la escuela de ingeniería civil, a los profesores y mi directora de proyecto por todo lo aportado en mi crecimiento integral.*
- *A Sergio Arguello porque sin él no hubiese sido posible la realización de este proyecto, le agradezco por ser mi compañero y aguantarme como amigo*
- *A mi familia en especial a Angelmira, Gilma, Adriana y Alberto porque fueron más que un apoyo en nuestras vidas y a mi hermano porque es el motor de mi vida.*

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	12
1. TEORIA PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	14
1.1. METODO DE EQUILBRIO LÍMITE	14
1.2. MÉTODO PHI-C REDUCCIÓN	15
2. DESCRIPCIÓN DEL METODO PHI-C REDUCCIÓN EN EL PAQUETE DE PLAXIS	17
3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL METODO PHI-C REDUCCIÓN	22
3.1. MALLA DE DISCRETIZACIÓN	22
3.2. CONVERGENCIA	23
3.3. AGUAS SUBTERRÁNEAS	23
3.4. FORMA NO LINEAL DE LA SUPERFICIE DE FALLA	23
4. METODOLOGIA UTILIZADA PARA EL ESTUDIO DEL METODO PHI – C REDUCCION EN PARALELO CON LAS TEORIAS CONVENCIONALES DE EQUILIBRIO LÍMITE	25
5. CONCLUSIONES	34
BIBLIOGRAFIA	37

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Número de casos y sus respectivas variaciones.	26
Tabla 2. Condiciones del terreno para el caso 1 con variaciones en el ángulo de inclinación del talud.	27
Tabla 3. Condiciones del terreno para el caso 2 con variaciones en el ángulo de fricción.	28
Tabla 4. Condiciones del terreno para el caso 3 con variaciones en la cohesión.	30
Tabla 5. Condiciones del terreno para el caso 4 con variaciones en las alturas de saturación.	31
Tabla 6. Condiciones del terreno para el caso 5 con variaciones en el módulo de elasticidad.	32
Tabla 7. Condiciones del terreno para el caso 6 con variaciones en el coeficiente de poisson.	33

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Técnica de reducción de la resistencia del terreno. Fuerzas en desequilibrio a medida que el factor de seguridad de prueba aumenta (Dawson et al., 1999)	16
Figura 2. Incrementos Por Reducción De Esfuerzos.	20
Figura 3. (a) Aproximación de una superficie de rotura no lineal (a) dejar de lado la cohesión (b) teniendo en cuenta una cohesión computacional artificial	24
Figura 4. Dimensiones del talud	26
Figura 5. Variaciones en la inclinación del talud	28
Figura 6. Variaciones en el Ángulo de Fricción	29
Figura 7. Variaciones en la cohesión	30
Figura 8. Estados de saturación para un talud con topografía y parámetros de resistencia constantes.	32

RESUMEN

TITULO: Método De Phi-C Reducción *

AUTORA: Dayarith Yohana Nova Burgos**

PALABRAS CLAVE— Angulo de fricción, cohesión, elementos finitos, factor de seguridad, parámetros, reducción.

DESCRIPCIÓN

El Método phi-c reducción, es un método resiente para el cálculo del factor de seguridad en el análisis de estabilidad de taludes, basado en el modelo constitutivo de Mohr- Coulomb con un enfoque no lineal para suelos con bajas tensiones, en el método phi-c reducción no se incrementan las cargas como normalmente se realiza en los métodos convencionales, si no que se reducen los parámetros de resistencia, Angulo de fricción (ϕ) y la cohesión (c), hasta llevarlos a situaciones críticas como lo es el fallo. Una de las diferencias más significativas entre el método phi-c reducción y los métodos convencionales es que phi-c reducción se basa en el cálculo de esfuerzos y deformaciones en el suelo, mientras que los métodos convencionales por equilibrio limite no lo tienen en cuenta los esfuerzos, ni las deformaciones para el análisis y se basa en la estática de las fuerzas.

El método phi-c reducción consiste entonces, en dar un supuesto valor del factor de seguridad, que normalmente es igual a uno, donde se tendrán parámetros de resistencia del suelo iniciales y serán analizados con el factor de reducción, con esté análisis se encontrara el factor de seguridad y la superficie de falla critica inmediatamente después del fallo. Este análisis es un proceso iterativo, que se realiza para cada uno de los parámetros de resistencia (phi y c). Entre varias ventajas que tiene el método, se destaca que permite un análisis de desplazamientos, cargas y deformaciones como complemento en el análisis de estabilidad de taludes.

* Trabajo de Grado

** Facultad Ingeniería Civil. Escuela Fisicomecánicas. Director Hebenly Celis Leguizamo

ABSTRACT

TITLE: Method Phi-C reduction *

AUTHOR: Dayarith Yohana Nova Burgos **

Key words— Angle of friction, cohesion, finite elements, safety factor, parameters, reduction.

DESCRIPTION

The phi-c reduction method is a method for calculating resents safety factor in the slope stability analysis, based on the constitutive model with Mohr-Coulomb nonlinear approach for soils with low voltages, in the method phi -c reduction loads are not increased as is typically done in conventional methods, if not to reduce the strength parameters, friction angle (φ) and cohesion (c) to bring critical situations such as failure . One of the most significant differences between the phi-c reduction method and the conventional methods is that phi-c reduction is based on the calculation of stress and strain in the soil, while conventional methods for equilibrium limited not take into account efforts or deformations for the analysis and is based on the static forces.

The phi-c reduction method then consists in giving an alleged value of the safety factor, which is usually equal to one, where you have strength parameters and initial soil will be analyzed with the reduction factor, was found to be analyzing the safety factor and critical failure surface immediately after the failure. This analysis is an iterative process, which is performed for each of the strength parameters (phi c). Among several advantages of the method, it is stressed that allows an analysis of displacements, loads and deformations in addition to the slope stability analysis.

* Graduation Work

** Civil Engineering Faculty. Physicomechanical School. Director Hebenly Celis Leguizamo

INTRODUCCION

La historia dice que plaxis, es un programa que empezó por la necesidad de resolver problemas en diques y que ha venido creciendo por la constante inversión en trabajo y economía; es así como surge este software como parte de la revolución de los elementos finitos para aplicaciones ingenieriles pues puede trabajar desde el análisis de esfuerzos y deformaciones de automóviles, aeronaves, estructuras hasta aplicaciones de mecánica de fluidos y flujo magnético entre otros.

Para el presente artículo, el interés por plaxis será en las aplicaciones geotécnicas, no obstante nuestro principal interés es en el método phi-c reducción, que es una opción de análisis en el paquete que el software de plaxis presenta, el método phi-c reducción se enfoca en el cálculo del factor de seguridad y su respectiva superficie de falla. El método aunque es diferente al equilibrio límite porque no hace el incremento de carga, si no que reduce los parámetros de resistencia hasta el fallo, es basado en el modelo de Mohr-coulomb, simulando el comportamiento del suelo.

En este artículo se hablara del método phi-c reducción, se darán a conocer las ventajas y desventajas, al ser comparando con métodos tradicionales como el de equilibrio límite, también se presentaran los resultados obtenidos al modelar distintos casos como: el cambio de pendiente, la variación en los parámetros de resistencia y la altura del nivel freático. Adicional a esto, se mencionan con detalle los factores que afectan los resultados obtenidos en los métodos; estos resultados se presentan teóricamente y de manera gráfica para mejorar el análisis.

El interés general es dar a conocer el método como complemento a los métodos tradicionales por su valor agregado, que en este caso es la presentación de las deformaciones en el suelo, pues sabemos que la seguridad de los taludes tiene un amplio interés económico y social que determinan diferentes enfoques en el análisis.

1. TEORIA PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Para el análisis de la estabilidad de taludes, los métodos convencionales basados en el equilibrio límite son los más utilizados, por la facilidad en el cálculo y por costumbre, pero ahora existen los métodos numéricos por elementos finitos, diferencias finitas que mejoran la manera de expresar las aproximaciones en la estabilidad de taludes con una representación más detallada.

1.1. METODO DE EQUILIBRIO LÍMITE

Este método es utilizado desde hace muchos años por su facilidad de cálculo y sus resultados aproximados a los reales, se caracteriza por realizar los cálculos a partir de superficies de rotura circular y estas a su vez son divididas en rebanadas; antes de los 70', estos estudios eran realizados en dos dimensiones, trayendo consigo diferencias significativas respecto a los valores reales, a veces resultaba más seguro, porque la resistencia en los planos que limitan la rotura se ignoraban y en otros casos arrojaba resultados de poca seguridad. Para este tiempo el método cuenta con un análisis tridimensional, que mejora los resultados.

Como bien su nombre lo indica el método llega a un equilibrio estático, seguidamente se busca la superficie de rotura que será representada como una línea, se establece que la masa que está por encima de la superficie (línea) se desliza, en relación con la masa que está por debajo de dicha línea, produciendo de esta manera la rotura.

Aunque hay muchos autores que han hecho sus estudios en base a este tipo de análisis de estabilidad, se puede generalizar algunas ventajas como:

- El cálculo del factor de seguridad depende de los parámetros de resistencia
- La masa deslizada se asume con un comportamiento rígido
- Se emplean las ecuaciones de equilibrio para obtener el valor del coeficiente de seguridad que depende de los valores promedios tangenciales y normales, actuantes en las superficies de deslizamiento.
- La relación esfuerzo-deformación, no interviene en este tipo de análisis.

La superficie de deslizamiento puede ser una desventaja en caso de terreno complicados pues lo que se requiere es un algoritmo de búsqueda, corriendo el riesgo de no encontrar exactamente la superficie de deslizamiento crítico, al no encontrar la superficie exacta se hace inseguro el cálculo, también tiene como desventaja no encontrar el correcto estado de tensión inicial por el tamaño de las dovelas y las suposiciones para la inclinación de las fuerzas de empuje.

1.2. MÉTODO PHI-C REDUCCIÓN

Los primeros estudios fueron realizados por Zienkiewicz, (1975), sobre un terraplén y una excavación, dejando constante el ángulo de fricción y reduciendo la cohesión hasta encontrar el fallo; se analizó para el caso de material asociado es decir cuando el ángulo de dilatancia es igual al ángulo de fricción y para el caso no asociado cuando no hay dilatancia.

En el método phi-c reducción se realiza un análisis no lineal y se basa en el modelo de Mohr-Coulomb, este método garantiza el cálculo del factor de seguridad, por medio de la reducción de los parámetros de resistencia del suelo.

En la ecuación (1) y (2) se demuestra que se genera un análisis de reducción para la cohesión y otro análisis de reducción para el ángulo de fricción, inicialmente se empieza el cálculo con un factor multiplicador fijado en 1.0,

después se va aumentando los valores del factor de seguridad hasta que ocurre el fallo. De esta manera el método phi-c reducción empieza su proceso de iteración y es por esto que el método resulta tedioso, pero con la utilización de los elementos finitos, la velocidad en el cálculo disminuye significativamente.

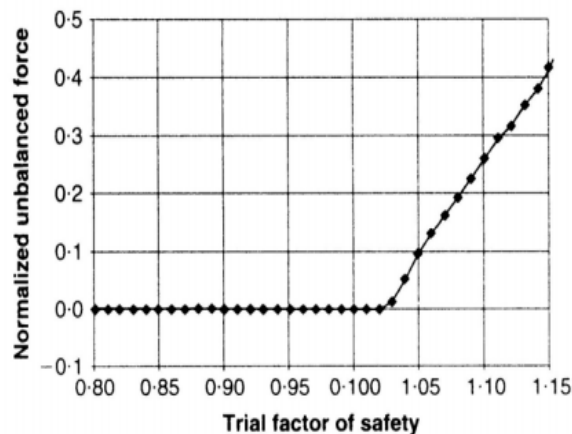
La técnica de reducción se puede ver en la figura 1, donde se puede analizar que el método realiza su proceso iterativo hasta que no converjan los cálculos en el ángulo de fricción o en la cohesión, es decir, cuando se considera inestable.

$$C_{prueba} = \frac{c}{F_{prueba}} \quad (1)$$

$$\phi_{prueba} = \text{Arctg} \frac{\text{tg}(\phi)}{F_{prueba}} \quad (2)$$

Siendo ϕ el ángulo de fricción, C la cohesión y F el factor multiplicador para la reducción de parámetros.

Figura 1. Técnica de reducción de la resistencia del terreno. Fuerzas en desequilibrio a medida que el factor de seguridad de prueba aumenta (Dawson et al., 1999)



Fuente: (Dawson et al., 1999)

2. DESCRIPCIÓN DEL METODO PHI-C REDUCCIÓN EN EL PAQUETE DE PLAXIS

Como se ha mencionado anteriormente, este método determina la superficie de deslizamiento crítico y su correspondiente factor de seguridad, mediante la reducción de los parámetros de resistencia al corte del suelo (cohesión y ángulo de fricción), en base al modelo constitutivo de Mohr-Coulomb elasto-plástico y a las deformaciones debido a los esfuerzos en el suelo.

El cálculo se realiza de forma continua e iterativa hasta que no converja, es decir hasta que se encuentre la superficie de falla crítica, por eso los datos arrojados no son precisos, pues se tienen datos inmediatamente después de la falla y no antes de que la falla ocurra, pero para tener control ante este acontecimiento, el software Plaxis, utiliza el control de longitud de arco o control de desplazamientos indirectos, de esta manera se realizan de una forma segura, los cálculos de cargas y los mecanismos de falla.

El método phi-c reducción solo tiene en cuenta la superficie de falla crítica, ignorando posibles superficies para los valores cercanos al factor de seguridad encontrado, esta condición representaría una desventaja para el método porque omite fallos que pueden ser importantes, pero en el paquete del software Plaxis se encuentra la opción de análisis de curvas, donde el usuario puede interpretar y encontrar más que la superficie crítica, por ejemplo la carga para el asentamiento requerido. Otro aspecto, no menos importante, es saber que el método phi-c reducción no se puede utilizar al iniciar una fase de cálculo, pues este método termina en un estado de fallo.

A manera del cálculo y teniendo en cuenta solo las deformaciones planas, el modelo de Mohr-Coulomb elasto-plástico se representa como:

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon^P) \quad (3)$$

$$\varepsilon^P = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{d} \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} D \varepsilon \quad (5)$$

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} D \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (6)$$

$$f = \tau - C \cot \phi + \sigma \quad (7)$$

$$g = \tau - \sigma \tan \phi \quad (8)$$

Finalmente para los esfuerzos se tiene:

$$\tau^2 = \frac{1}{4} (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xy}^2 \quad (9)$$

$$\sigma = -\frac{1}{2} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (10)$$

Dónde:

σ = Esfuerzo normal

τ = Esfuerzo cortante

D = Matriz de elasticidad

ε = Deformaciones

F = Función rendimiento

G = Función potencial plástico

La integración implícita se necesita en el Análisis de elementos finitos que implican incrementos finitos de esfuerzos y de tensión; Para analizar los incrementos de deformaciones plástica y total, de esfuerzos y tensiones, el método de integración determina el estado de dirección de flujo y se calcula integrando el incremento de deformaciones plástica, (Ver ecuación 5) se tiene:

$$\Delta \varepsilon^P = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} dt \quad (11)$$

$$\Delta \varepsilon^P = \frac{\partial g}{\partial \sigma} \lambda dt$$

$$\Delta \varepsilon^P = \frac{f^e}{d} \frac{\partial g}{\partial \sigma}$$

Ahora para el cálculo en función del incremento de deformación total tenemos,

$$\Delta f^e = f \sigma^* + D \Delta \varepsilon \quad (12)$$

Siendo σ^* = tensión al inicio de la carga.

Para el incremento de tensiones finalmente se tiene

$$\Delta \sigma = D \Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon^P \quad (13)$$

Es decir que el incremento de tensiones depende de las deformaciones y la matriz de elasticidad.

Consideración de los elementos finitos

Se considera un cuerpo de gravedad y cargas externas constantes, (ver figura 2) en primera instancia muestra la condición de equilibrio y el giro del rendimiento al disminuir los parámetros de resistencia, en la figura 2, se puede ver claramente que esto ocurre cuando las fuerzas y las cargas externas, están sobre un mismo vector, llamado Q (vector de fuerzas nodales).

$$Q^0 = \int_V B \sigma^0 dv \rightarrow Q^0 = \int_V B \sigma dv \quad (14)$$

Y para la dependencia de las tensiones

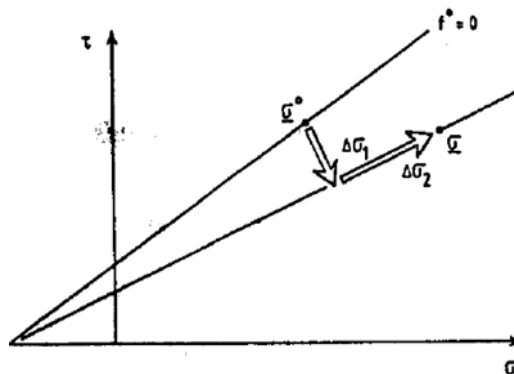
$$\sigma = \sigma^0 + \Delta r^1 + \Delta r^2 \quad (15)$$

$$\text{Con } \Delta r^2 = D \Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon^P \quad (16)$$

$$\text{Y } \sigma^0 + \Delta r^1 \quad (17)$$

Como la proyección del punto más cercano en la nueva superficie de fluencia para σ^0 .

Figura 2. Incrementos Por Reducción De Esfuerzos.



Fuente: Métodos informáticos y los avances en geomecánica

Sustituyendo en la ecuación de equilibrio (ver ecuación 15) y disponiendo de $E = BU$ para un procedimiento de tensión inicial en el control de longitud de arco, tenemos

$$K\Delta u = R^0 + \Delta R + P \quad (19)$$

Dónde:

$$R^0 = Q^0 - \int_V B\sigma^0 dv = 0 \quad (20)$$

$$\Delta R = - \int_V B\Delta r^1 dv \quad (21)$$

$$P = \int_V BD\Delta\varepsilon^P dv \quad (22)$$

P = Vector de pseudo carga

K = Matriz de rigidez elástica

Para las iteraciones entonces se tiene en cuenta el siguiente paso como se puede ver en las ecuaciones 23 y 24.

$$K\Delta u^{k+1} = R^0 + \Delta R + P^k \quad (23)$$

$$\text{Para } k = 1,2,3,4 \dots k_{\text{máx}} \quad (24)$$

3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL METODO PHI-C REDUCCIÓN

La malla de discretización, el criterio de convergencia y el nivel del agua subterránea son unas de las funciones que se estudian para indicar las diferencias o similitudes entre el método de equilibrio limite y método de elementos finitos con C-phi reducción.

3.1. MALLA DE DISCRETIZACIÓN

Para análisis de elementos finitos se tienen ejemplos de métodos como c-phi reducción, que arrojan cálculos de factor de seguridad y la superficie de deslizamiento crítica; aquellas que utilizan el método de dovelas como método de Morgenstein-Price, el método simplificado de Bishop asumen una función para la distribución de las componentes verticales de las presiones de tierra. En el caso de aquellos métodos donde se asumen las dovelas, se tienen dos capas, una débil y una fuerte, obteniendo un factor de seguridad mayor para el punto ubicado en la capa fuerte y para los métodos con análisis por elementos finitos se tienen elementos triangulares o cuadriláteros con diferentes números de nodos, dependiendo de lo elegido en la deformación plana, es importante tener en cuenta que esta discretización puede variar los cálculos significativamente, pues esta depende del tiempo empleado y el grado de exactitud, por eso se recomienda un análisis diferente para cada caso.

3.2. CONVERGENCIA

El criterio de convergencia y el paso son factores que influyen en el resultado, porque el fallo de la pendiente se indica por la falta de convergencia en los cálculos de los elementos finitos y también la tolerancia en pasos secuenciales como la influencia de los parámetros de entrada en el factor de seguridad; la variación de estos resultados es significativa si se evalúan parámetros individuales (cambios de tiempo mínimo, máximos y la tolerancia) y parámetros simultáneos; lo que quiere decir que no es suficiente comprobar los parámetros de convergencia individual, también debe considerarse la evaluación de los parámetros combinados entre ellos.

3.3. AGUAS SUBTERRÁNEAS

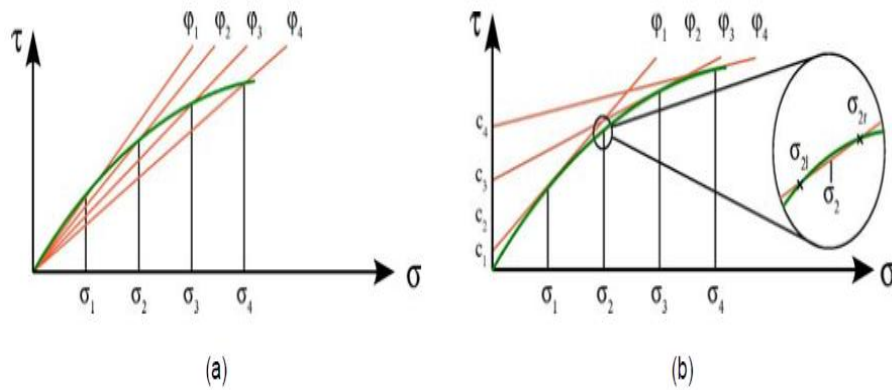
El agua es un factor importante pues es la responsable de reducir tensiones efectivas (producen cambios de volumen y resistencia de corte en suelos saturados, secos), y estas tensiones son directamente relacionadas con las deformaciones producidas en el suelo. Para el caso del método phi-c reducción que se basa en el análisis de deformaciones se encontraran diferencias significativas en los resultados del cálculo del factor de seguridad en variaciones del nivel freático.

3.4. FORMA NO LINEAL DE LA SUPERFICIE DE FALLA

Usualmente el ángulo y la cohesión se suponen constantes, pero para bajas tensiones el comportamiento es no lineal, por eso cuando se utiliza el criterio de falla de Mohr-Coulomb $\tau = \sigma \cdot \phi + c$. (ver figura 3), se tiene en cuenta una aproximación secante cuando no hay cohesión y una aproximación tangente

cuando se tiene en cuenta la cohesión. Los factores más influyentes en la curvatura de la superficie de falla son las fuerzas de superficie, cementación o la saturación parcial.

Figura 3. (a) Aproximación de una superficie de rotura no lineal (a) dejar de lado la cohesión (b) teniendo en cuenta una cohesión computacional artificial



Fuente: Cálculos avanzados de factores de seguridad para la estabilidad de taludes.

4. METODOLOGIA UTILIZADA PARA EL ESTUDIO DEL METODO PHI – C REDUCCION EN PARALELO CON LAS TEORIAS CONVENCIONALES DE EQUILIBRIO LÍMITE

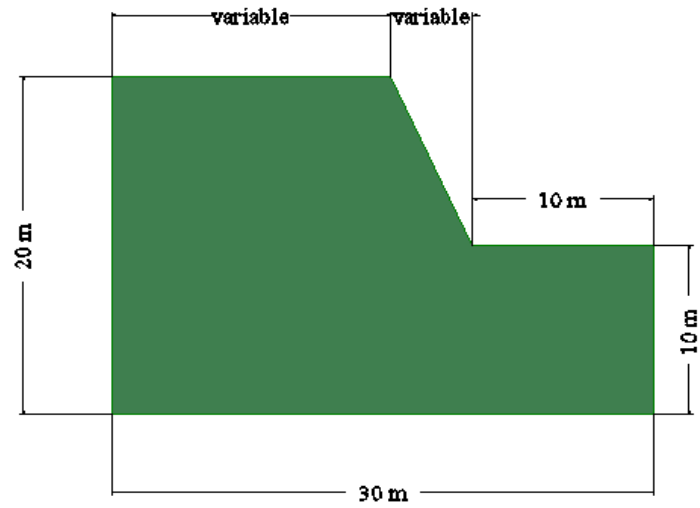
En el mundo ingenieril existen tres formas de evaluar métodos: el cualitativo, el semi-cuantitativo y el cuantitativo. La experiencia del profesional hace que los modelos se evalúen en un criterio semi-cuantitativo es decir que dado a un factor de seguridad se exprese un nivel de emergencia alta media o baja.

En este caso evaluamos el método de forma cuantitativa es decir asociados a patrones numéricos y al comportamiento esperado en las gráficas deducimos que tan acertado es un método en comparación de otros y llegado el caso cual es mejor o cual complementa.

Para escoger un modelo representativo geotécnicamente hablando y debido a la corta experiencia se decide adoptar la alternativa de variar parámetros, es decir hacer un análisis de sensibilidad de los mismos para encontrar las situaciones más críticas o más favorables en el cálculo del factor de seguridad entre los métodos; al hallar rangos de error, serán aceptados hasta en un 5%.

El análisis se basa primero en definir los parámetros que intervienen, para esto se presenta el modelo de un talud con las dimensiones de la figura 4; seguidamente se presentan los valores de las variaciones progresivas mostradas en la tabla 1.

Figura 4. Dimensiones del talud



Fuente: Autora

Tabla 1. Número de casos y sus respectivas variaciones.

	Inclinación del talud (grados)	Angulo de Fricción (grados)	Cohesión (Kn/m ²)	Peso específico (Kn/m ²)	Peso esp. Saturado (Kn/m ²)	Modulo de Elasticidad (Mpa)	Coefficiente de Poisson
Caso 1	45- 90	10	12	17	18	13000	0,3
Caso 2	55	05 - 30	12	17	18	13000	0,3
Caso 3	55	15	05 - 25	17	18	13000	0,3
Caso 4	55	15	10	17	18	13000	0,3
caso 5	55	15	10	17	18	10000-500000	0,3
caso 6	55	15	10	17	18	13000	0,25 - 0,45

Fuente: Autora

Caso 1. Variación en la Pendiente del talud

Caso 2. Variación en el Angulo de Fricción

Caso 3. Variación en la Cohesión

Caso 4. Condiciones de Saturación

Caso 5. Variación en el Módulo de Elasticidad

Caso 6. Variación en el Coeficiente de Poisson

Caso 1. Variaciones en la pendiente del talud

La variación en los ángulos de inclinación del talud se manejó entre 45 y 90° con variaciones cada 5°, para este caso se trabajó con los parámetros de la tabla 2.

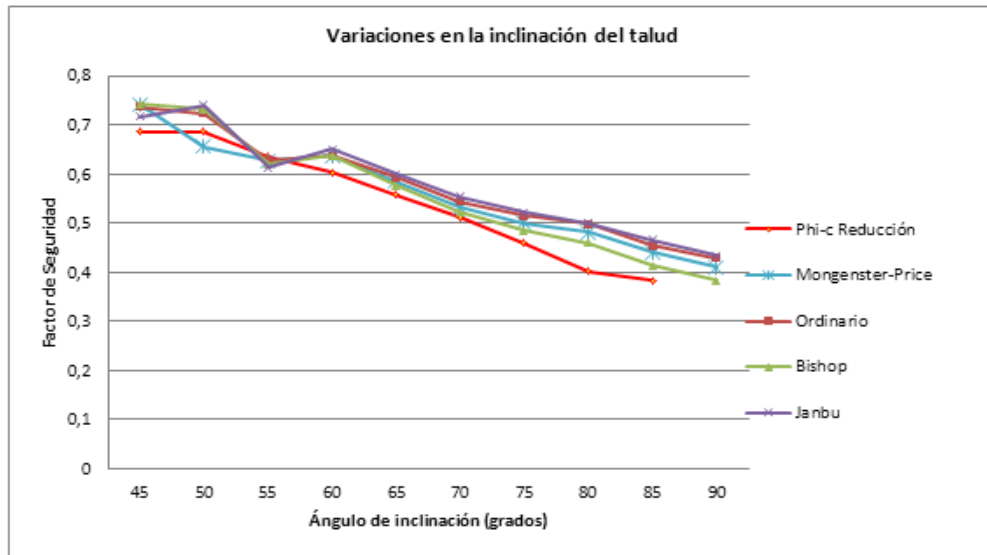
Tabla 2. Condiciones del terreno para el caso 1 con variaciones en el ángulo de inclinación del talud.

Ángulo de Fricción (grados)	Cohesión (Kn/m ²)	Peso específico (Kn/m ²)	Peso esp. Saturado (Kn/m ²)	Modulo de Elasticidad (Mpa)	Coficiente de Poison
10	12	17	18	13000	0,3

Fuente: Autora

En la figura 5. Se observa la influencia de las inclinaciones fuertes en el cálculo del factor de seguridad para taludes, se puede ver claramente que la tendencia es que al incrementar el ángulo de inclinación respecto a la horizontal del talud, disminuye el factor seguridad en todos los métodos. Para el método phi-c reducción, tenemos resultados conservadores respecto a los arrojados por los métodos que utilizan equilibrio límite, aunque se tiene un punto donde la diferencia entre los métodos tiende a cero.

Figura 5. Variaciones en la inclinación del talud



Fuente: Autora

Caso 2. Variaciones en el Ángulo de Fricción.

A partir del caso 1, se tomó el ángulo de inclinación donde el factor de seguridad es el más aproximado para los 5 métodos; en este caso se varía el ángulo de fricción desde 5 a 35° y se mantienen constantes los parámetros de resistencia dados en la tabla 3.

Tabla 3. Condiciones del terreno para el caso 2 con variaciones en el ángulo de fricción.

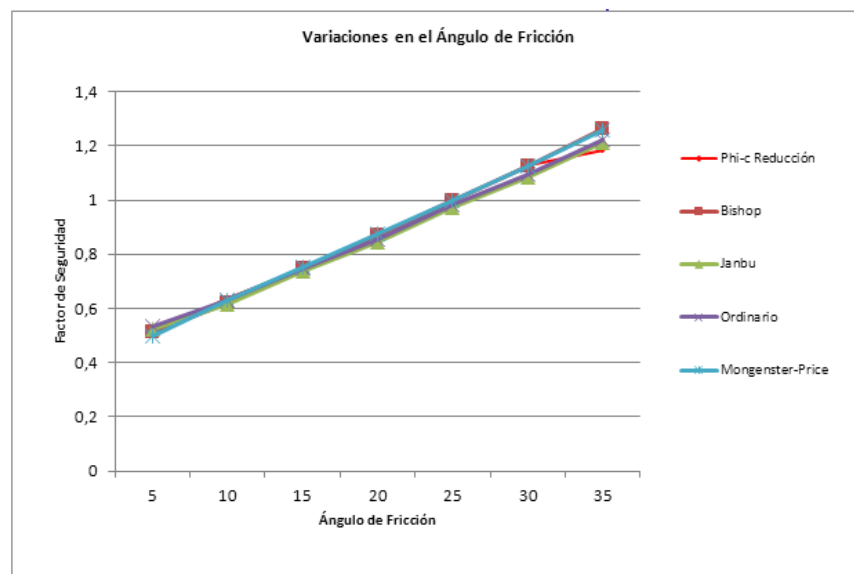
Inclinación del talud (grados)	Cohesión (Kn/m ²)	Peso específico (Kn/m ³)	Peso esp. Saturado (Kn/m ³)	Modulo de Elasticidad (Mpa)	Coficiente de Poison
55	12	17	18	13000	0,3

Fuente: Autora

En la figura 6. Se puede ver que para las condiciones dadas, el factor de seguridad calculado tanto por equilibrio limite como por phi-c reducción, tienen resultados muy aproximados y al aumentar el ángulo de fricción se tiene mayor factor de seguridad, es decir que el ángulo de fricción teniendo parámetros de resistencia y ángulo de inclinación constantes, es proporcional al factor de seguridad.

Para un ángulo de fricción de 15° el factor de seguridad se hace igual y aunque no son muy significativas las diferencias entre los métodos convencionales y el método phi-c reducción, se observa que el método phi-c reducción arroja valores de factor de seguridad más conservadores.

Figura 6. Variaciones en el Ángulo de Fricción



Fuente: Autora

Caso 3. Variaciones en la Cohesión

Al tener el ángulo de inclinación y el ángulo de fricción dados en los casos 1 y 2, en este caso se tiene como objetivo encontrar el valor de la cohesión, para que el

factor de seguridad sea igual o tenga mayor aproximación, para esto se tendrá variaciones para la cohesión entre 5 y 25 Kn/m².

Los datos para este caso serán mostrados en la tabla 4.

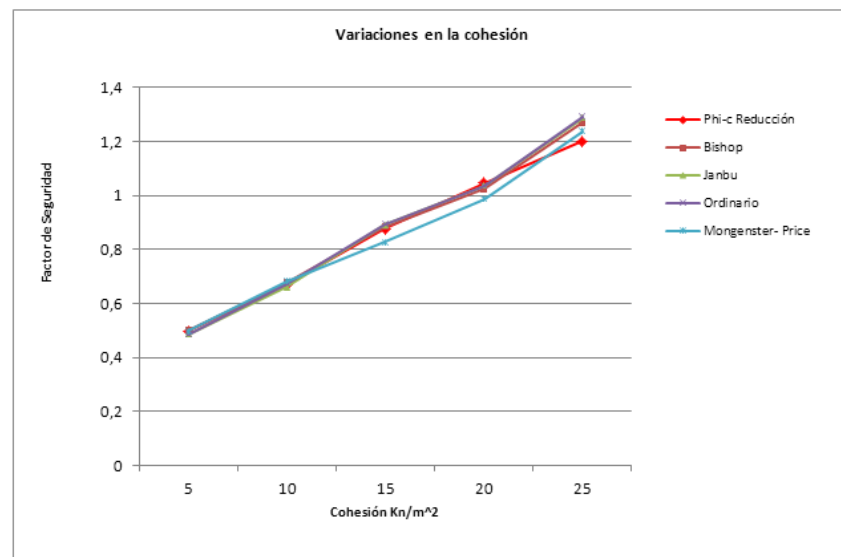
Tabla 4. Condiciones del terreno para el caso 3 con variaciones en la cohesión.

Inclinación del talud (grados)	Angulo de Fricción (grados)	Peso específico (Kn/m ²)	Peso esp. Saturado (Kn/m ²)	Modulo de Elasticidad (Mpa)	Coficiente de Poison
55	15	17	18	13000	0,3

Fuente: Autora

La tendencia de la figura 7 es nuevamente lineal, es decir que al aumentar la cohesión, tengo mayores factores de seguridad, esto se atribuye a la contribución que la cohesión realiza en la resistencia de suelos. En este caso el método phi-c reducción no tiene los valores más conservadores pero se mantiene en el rango de aceptación para los resultados.

Figura 7. Variaciones en la cohesión



Fuente: Autora

Caso 4. Estados de Saturación

Con los datos obtenidos de los casos 1, 2 y 3, se analizara en este caso un talud para un estado saturado bajo y un talud para un estado de saturación alto, los datos para este caso son mostrados en la tabla 5.

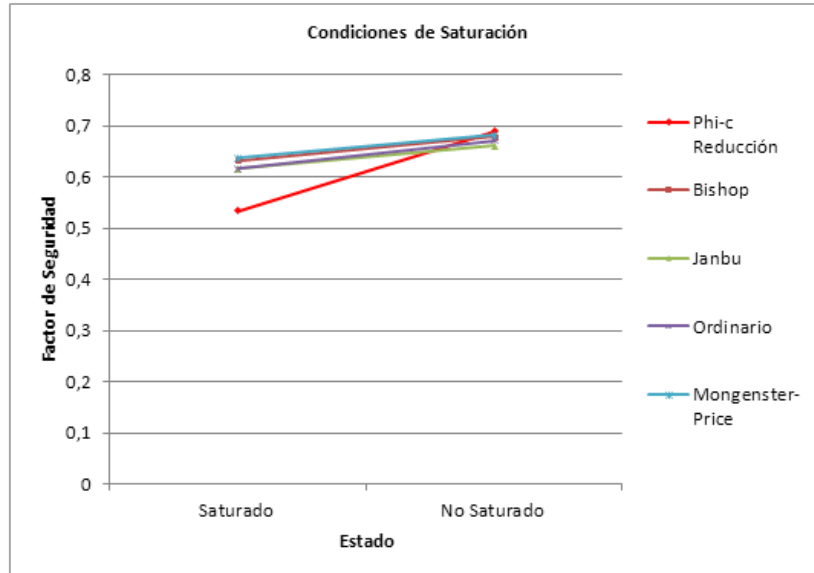
Tabla 5. Condiciones del terreno para el caso 4 con variaciones en las alturas de saturación.

Inclinación del talud (grados)	Angulo de Fricción (grados)	Cohesión (Kn/m ²)	Peso específico (Kn/m ²)	Peso esp. Saturado (Kn/m ²)	Modulo de Elasticidad (Mpa)	Coeficiente de Poison
55	15	10	17	18	13000	0,3

Fuente: Autora

En la figura 8, se demuestra la importancia de analizar el efecto que tiene el agua como responsable de la reducción de las tensiones efectivas en el suelo y se observa que el método phi-c reducción para un estado no saturado tiene factores de seguridad iguales a los métodos convencionales, mientras que para estados saturados, el análisis es más riguroso, con grandes diferencias en los valores del factor de seguridad.

Figura 8. Estados de saturación para un talud con topografía y parámetros de resistencia constantes.



Fuente: Autora

Caso 5 y 6. Variaciones del Módulo de Elasticidad y coeficiente de Poisson.

En este caso se tuvo en cuenta solo el método phi-c reducción porque el método de equilibrio límite en el software de Geo-slope no requiere de estas condiciones, es importante tener en cuenta estos casos porque el módulo de elasticidad es la relación de esfuerzos-deformaciones y el coeficiente de Poisson es una relación entre las deformaciones transversales y las deformaciones longitudinales.

Para este caso los datos serán mostrados en la tabla 6 y en la tabla 7.

Tabla 6. Condiciones del terreno para el caso 5 con variaciones en el módulo de elasticidad.

Inclinación del talud (grados)	Angulo de Fricción (grados)	Cohesión (Kn/m ²)	Peso específico (Kn/m ²)	Peso esp. Saturado (Kn/m ²)	Coficiente de Poisson
55	15	10	17	18	0,3

Fuente: Autora

Tabla 7. Condiciones del terreno para el caso 6 con variaciones en el coeficiente de poisson.

Inclinación del talud (grados)	Angulo de Fricción (grados)	Cohesión (Kn/m2)	Peso específico (Kn/m2)	Peso esp. Saturado (Kn/m2)	Modulo de Elasticidad (Mpa)
55	15	10	17	18	13000

Fuente: Autora

Para estos casos no se obtuvo variaciones del factor de seguridad como se esperaba, tanto la variación en el módulo de elasticidad como la variación en el coeficiente de poisson, mostraron como respuesta un factor de seguridad constante, es decir no hubo cambios.

Por último se debe tener en cuenta que para el método phi-c reducción en el software plaxis, es necesario ubicar un punto para la superficie de falla, en este artículo se ubicó para todos los casos en el mismo sitio, pero también se tuvo en cuenta la variación de este punto sobre todo el modelo y como resultado se obtuvo un mismo factor de seguridad sin importar la ubicación de la superficie de falla hecha por el usuario.

5. CONCLUSIONES

- En el método phi-c reducción es importante tener en cuenta el número de iteraciones y el tamaño de la malla; para un número alto de iteraciones y una malla muy fina se dice que el método converge y el modelo está perfectamente configurado, pues al tener una malla fina se disminuyen los errores por discretización, las variaciones en los factores de seguridad de una malla fina y una malla gruesa pueden estar variando entre 5 y 20% dependiendo del caso, con valores bajos para la malla fina. Como desventaja se tiene el aumento de tiempo en el cálculo, por eso si el interés es solo visualizar el mecanismo de fallo entonces se debe considerar una malla y número de iteraciones recomendadas por el software.
- Para el método de phi-c reducción en plaxis es necesario la ubicación de la superficie de falla, pero este valor no cambia al mover el punto, pues aunque se necesite de un punto de referencia lo que hace el software es un análisis a cada nodo y elemento.
- Aunque el software plaxis maneje un sistema que implique hallar factores de seguridad teniendo en cuenta parámetros como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, la diferencia en los resultados entre los métodos, se presentan de manera significativa cuando las condiciones y la topografía del talud son complicadas. Como lo demostrado en el caso 1, para un mayor ángulo, mayor será la diferencia entre los resultados.
- Para la variación en el ángulo de fricción, se tiene que por cada 5° el factor de seguridad tiene un aumento del 10% aproximadamente; en este caso la diferencia entre los métodos se hace significativa para ángulos de fricción

mayores a 25° con las condiciones mencionadas. Se concluye que el ángulo de fricción es un factor que produce cambios entre los métodos, pero para suelos con alta fricción y topografías complicadas.

- Del tercer caso se puede concluir que la cohesión no es un parámetro que afecte significativamente los resultados a la hora de calcular el factor de seguridad para estabilidad de taludes con los métodos convencionales y el método phi-c reducción. Pero se tiene en cuenta que al aumentar la cohesión aumenta el factor de seguridad.
- Cuando interviene el agua en el cálculo del factor de seguridad, este disminuye considerablemente para el método phi-c reducción, pues el método tiene en cuenta las deformaciones y los esfuerzos, que están directamente relacionadas con las tensiones efectivas del suelo.
- Para los casos de la variación del módulo de elasticidad y de Poisson, se concluye que este comportamiento se debe a las condiciones planteadas, porque el método phi-c reducción se basa en las deformaciones y los esfuerzos, a su vez estas deformaciones y esfuerzos depende del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson, aunque es más significativo el aporte que el módulo de elasticidad tiene respecto a las deformaciones.
- Aunque estos hayan sido los resultados, no se puede generalizar el valor de afectación por parte de los parámetros planteados, porque los suelos normalmente no se encuentran en condiciones ideales, es decir este mismo estudio podría arrojar tendencias parecidas pero no iguales, para suelos con dos capas o estratos, entre otras variaciones que se pueden encontrar como un modelo con cargas. Se supone que los resultados siguen siendo conservadores para el método phi-c reducción, pero sería recomendable analizar las situaciones.

REFERENCIAS

A. REFERENCIAS DE ARTICULOS

- [1] Verruijt, A (2001). Soil mechanics.Delft University of technology.
- [2] M. Kupka, I. Herle and M. Arnold Advanced Calculations of safety factors for slope stability. International Association for computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa, India; October,2008.
- J.R Booker & J.P. Carter. Computer Methods and Advances in Geomechanics. Proceedings of he seventh international conference on computer methods and advances in geomechanics. Cairns, May 1991.

B. REFERENCIAS DE LIBROS

- BOWLES, J. E. *Foundation Analysis and Design*. New York: McGraw-Hill, 5th Edition, 2002.
- DAS, BRAJA .Principió de ingeniería de cimentaciones. Thompson Learning.
- GONZALEZ DE VALLEJO, LUIS. *Ingenieria Geologica*. México: Pearson Education, Edition 2002
- PLAXIS. General Information
- PLAXIS. Reference Manual

C. REFERENCIAS DE TESIS

- Sirgurdur Mar Valsson, Earth pressures against-and stability of retaining structures [Magister Scientiarum degree in civil engineering, Thesis] University of Iceland, molde, june 2011.

BIBLIOGRAFIA

- BOWLES, J. E. *Foundation Analysis and Design*. New York: McGraw-Hill, 5th Edition, 2002.
- DAS, BRAJA .Principio de ingeniería de cimentaciones. Thompson Learning.
- GONZALEZ DE VALLEJO, LUIS. *Ingeniería Geológica*. México: Pearson Education, Edition 2002
- J.R BOOKER & J.P. CARTER. Computer Methods and Advances in Geomechanics. Proceedings of the seventh international conference on computer methods and advances in geomechanics. Cairns, May 1991.
- M. KUPKA, I. HERLE AND M. Arnold Advanced Calculations of safety factors for slope stability. International Association for computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa, India; October,2008.
- PLAXIS. General Information
- PLAXIS. Reference Manual
- SIRGURDUR MAR VALSSON, Earth pressures against-and stability of retaining structures [Magister Scientiarum degree in civil engineering, Thesis] University of Iceland, molde, june 2011.
- VERRUIJT, A. Soil mechaniscs.Delft University of technology.2001.