



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos



Universidad de Cantabria

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FRENTE AL TOPPLING EN TALUDES DE ROCA

Trabajo realizado por:

Jagoba Gamero Cuenda

Dirigido:

César Sagaseta Millán

Jorge Cañizal Berini

Titulación:

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Santander, Octubre de 2016

TRABAJO FINAL DE MÁSTER



TÍTULO DEL TRABAJO DE FINAL DE MÁSTER:

Análisis de estabilidad frente al toppling en taludes de roca

AUTOR: Jagoba Gamero Cuenda

DIRECTORES: César Sagaseta Millán

Jorge Cañizal Berini

CONVOCATORIA: Octubre de 2016

PALABRAS CLAVE:

Toppling, análisis de estabilidad, macizo rocoso, Goodman y Bray, hoja de cálculo, Microsoft Excel, Visual Basic.

RESUMEN:

En el presente trabajo se aborda el análisis de uno de los fenómenos de inestabilidad propios de los taludes rocosos conocido como “toppling” o vuelco de estratos. Este fenómeno está caracterizado por un vuelco o deslizamiento de los estratos alrededor de su pie transmitiendo su propia inestabilidad mediante contacto entre ellos a través del talud y generando que el conjunto del mismo no sea estable.

Partiendo del estado de conocimiento del fenómeno hasta la fecha, se ha ejecutado una hoja de cálculo en Microsoft Excel basada en el método de análisis propuesto por Goodman y Bray en 1977. Dichos autores propusieron un método de equilibrio límite tratando los estratos como bloques y verificando en base a ellos la estabilidad del talud.

Dicha hoja de cálculo se ha adaptado de tal manera que el espectro de casos posibles de análisis queda ampliado permitiéndose un análisis de taludes de hasta 6 tramos quebrados, uso de anclajes a lo largo de los mismos e introducción del efecto del nivel freático en el propio cálculo, casos que no son objeto de evaluación por ningún programa comercial actual.

La hoja de cálculo está íntegramente programada en Visual Basic a fin de que el usuario la encuentre una herramienta cómoda, intuitiva y fácil de usar, no debiendo más que introducir ciertos datos para realizar el cálculo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Bobet. A (1999) Analytical solutions for toppling failure. International Journal of Rock Mechanichs & Mining Sciences,36, pp 971-980

[2] Goodman. RE, Bray JW (1976). Toppling of rock Slopes. Proc. ASCE Spec. Conf. Rock Engng. For Foundations and Slopes, Boulder, Co. **2**, pp201-234

[3] Sagaseta C, Sánchez JM, Cañizal J (2001). A general analytical solution por the required anchor force in rock slopes with toppling failure. International Journal of Rock Mechanichs & Mining Sciences,38, pp 421-435

[4] Sagaseta C, Sánchez JM, Cañizal J (1996).Dimensionamiento de anclajes en taludes con vuelco de estratos. Simposio sobre Estructuras de Contención de Terrenos. Santander. Sociedad Española de Mécanica del Suelo y Cimentaciones. pp 159-176

[5] Sagaseta C. (1986) On the modes of instability of a rigid block on an inclined plane. Rock Mechanichs and Rock Engineering. pp 271-276



MASTER'S FINAL WORK TITLE:

Stability analysis in rock slopes with toppling failure.

AUTHOR: Jagoba Gamero Cuenda

DIRECTED BY: César Sagaseta Millán

Jorge Cañizal Berini

DATE: October 2016

KEYWORDS:

Toppling, stability analysis, rock mass, Goodman and Bray, worksheet, Microsoft Excel, Visual Basic.

ABSTRACT:

In this work it has been analyzed the stability failure mode of rock slopes known as toppling. This phenomenon it's characterized by the spill or slide of the layers which transmit their own instability through the slope block to block making the whole slope unstable.

Starting from the state of knowledge till the date, it has been done a Microsoft Excel worksheet inspired in Goodman's and Bray's Limit Equilibrium Method. The authors verify with this method the stability of the slope using blocks instead of layers.

This worksheet has been adapted to increase the spectrum of possible analysis cases allowing the use of different slope geometry, cables and the phreatic level incidence. It's important to mention the absence of commercial programs with this type of analysis.

The worksheet is all programmed in Visual Basic in order to ease the use of it to the user, making it comfortable, intuitive and easy to use. It's only necessary to introduce some information to do the analysis of the slope.

BIBLIOGRAPHY

[1] Bobet. A (1999) Analytical solutions for toppling failure. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*,36, pp 971-980

[2] Goodman. RE, Bray JW (1976). Toppling of rock Slopes. *Proc. ASCE Spec. Conf. Rock Engng. For Foundations and Slopes, Boulder, Co. 2*, pp201-234

[3] Sagaseta C, Sánchez JM, Cañizal J (2001). A general analytical solution por the required anchor force in rock slopes with toppling failure. *International Journal of Rock Mechanichs & Mining Sciences*,38, pp 421-435

[4] Sagaseta C, Sánchez JM, Cañizal J (1996).Dimensionamiento de anclajes en taludes con vuelco de estratos. *Simposio sobre Estructuras de Contención de Terrenos. Santander. Sociedad Española de Mécanica del Suelo y Cimentaciones*. pp 159-176

[5] Sagaseta C. (1986) On the modes of instability of a rigid block on an inclined plane. *Rock Mechanichs and Rock Engineering*. pp 271-276



ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	6
1.1	OBJETIVO Y DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO	6
2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	7
2.1	MECANISMOS DE INESTABILIDAD POR VUELCO	7
2.2	MÉTODOS DE CORRECCIÓN UTILIZADOS	9
3	MÉTODOS DE ANÁLISIS	10
3.1	EQUILIBRIO DE UN BLOQUE AISLADO	10
3.1.1	Análisis del bloque aislado.....	11
3.2	ANÁLISIS COMO TALUD INDEFINIDO	12
3.3	EQUILIBRIO LÍMITE DE SISTEMAS DE BLOQUES	13
3.4	ANÁLISIS TENSODEFORMACIONAL	17
3.5	APLICACIÓN PRÁCTICA	18
3.5.1	Criterio cinemático de [2] Goodman y Bray	18
3.5.2	Ábacos de Zanbak (1953)	18
3.6	SOLUCIÓN TEÓRICA, ANÁLISIS CONTINUO	19
3.6.1	Planteamiento.....	20
4	APLICACIÓN GENERAL DEL MÉTODO DE GOODMAN Y BRAY A CUALQUIER GEOMETRÍA DE TALUD, ANCLAJES Y EXISTENCIA DE NIVEL FREÁTICO.	22
4.1	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GOODMAN Y BRAY A CUALQUIER GEOMETRÍA DE TALUD	22
4.1.1	Objetivo.....	22
4.1.2	Planteamiento utilizado	22
4.1.3	Anexo de cálculos geométricos.....	27
4.2	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GOODMAN Y BRAY A CUALQUIER GEOMETRÍA DE TALUD Y CORRECCIÓN MEDIANTE USO DE ANCLAJES	31
4.2.1	Objetivo.....	31
4.2.2	Planteamiento utilizado	31
4.3	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GOODMAN Y BRAY A CUALQUIER GEOMETRÍA DE TALUD Y EXISTENCIA DE NIVEL FREÁTICO.....	38
4.3.1	Planteamiento utilizado	39
4.3.2	Anexo geométrico.	44
4.4	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GOODMAN Y BRAY A CUALQUIER GEOMETRÍA DE TALUD, EXISTENCIA DE NIVEL FREÁTICO Y CORRECCIÓN MEDIANTE ANCLAJES.	46
	46	
4.4.1	Objetivo.....	46
4.4.2	Planteamiento utilizado.	46
4.4.3	Limitaciones.....	47



5	UTILIZACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO.....	48
5.1	BASES DE FUNCIONAMIENTO.....	48
5.2	INTRODUCCIÓN DE DATOS DEL TALUD A EVALUAR.....	48
5.2.1	Datos relativos a la geometría del talud.....	48
5.2.2	Datos relativos al estrato rocoso.....	49
5.2.3	Posición de los anclajes.....	50
5.2.4	Definición del nivel freático.....	51
5.3	OPCIONES DE CÁLCULO OFRECIDAS.....	51
5.4	REVISIÓN DE CÁLCULOS PARCIALES.....	52
5.5	RESULTADOS DEL CÁLCULO.....	53
5.6	OBTENCIÓN DE GRÁFICOS.....	55
5.7	MENSAJES DE ERROR.....	55
5.8	EJEMPLOS DE RESOLUCIÓN.....	57
6.	CONCLUSIONES.....	70



1 INTRODUCCIÓN

Existen diversos fenómenos de inestabilidad de taludes rocosos, de los cuales los más frecuentes y por tanto más estudiados son aquellos referentes al deslizamiento o caída de cuñas o bloques.

A pesar de que el vuelco de estratos es en principio menos evidente, este fenómeno ha sido descrito tanto en taludes naturales como en taludes excavados por diversos investigadores a lo largo de las últimas 4 décadas, siendo tema de estudio en lo referente al propio funcionamiento del fenómeno, tipologías, análisis en casos reales y evaluación de las posibles medidas correctora.

Mención especial merece el trabajo en este campo desarrollado por el Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales de la Universidad de Cantabria encabezado por César Sagaseta Millán, responsables del avance en el mismo y que han publicado diversos artículos que ayudan en gran medida al correcto análisis e interpretación del fenómeno descrito así como a la búsqueda de soluciones al mismo.

1.1 OBJETIVO Y DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO.

Este Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo principal la ejecución de una hoja de cálculo que permita el estudio del fenómeno en base al modelo de equilibrio límite de bloques descrito por [2] Goodman y Bray.

Esta hoja de cálculo como se verá en posteriores apartados salva las principales limitaciones prácticas establecidas por los autores añadiéndose funcionalidades como la posibilidad de utilizar taludes de varios tramos, uso de varios anclajes en cualquier posición y la introducción de nivel freático en el cálculo.

En el capítulo 2 de este trabajo se hará mención a la propia definición del problema, sus posibles mecanismos de inestabilidad y las principales medidas correctoras utilizadas.

En el capítulo 3 se abordan los métodos de análisis del fenómeno, partiendo del análisis del equilibrio del bloque aislado hasta la solución teórica de gran aplicabilidad práctica determinada por [3] Sagaseta.

En el capítulo 4, ya descrito el modelo de equilibrio límite de bloques propuesto por [2] Goodman y Bray, se describe su aplicación general mediante la utilización de geometrías de mayor complejidad, adición del efecto de la existencia del nivel freático y la posibilidad de utilización de anclajes como medida correctora al fenómeno.

En el capítulo 5 se describe el funcionamiento de la hoja de cálculo generada a partir de todo lo descrito anteriormente, incluyendo todas las funciones disponibles en la misma, limitaciones, mensajes de error así como varios ejemplos resueltos que permiten ver su funcionamiento.

Finalmente, el capítulo 6 aborda las conclusiones obtenidas de este Trabajo de Fin de Máster.

Con todo lo descrito, este Trabajo de Fin de Máster pretende ser una ayuda a quien así lo requiera del entendimiento práctico del toppling, permitiendo al lector una ayuda a su comprensión y la posterior aplicación práctica mediante la hoja de cálculo realizada.



2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El “toppling” o también conocido como vuelco de estratos es un proceso de inestabilidad de taludes rocosos caracterizados por una familia de discontinuidades muy bien definida, cuyo rumbo es subparalelo a la traza y que buza fuertemente hacia el interior del talud.

Este proceso de inestabilidad está definido por el vuelco conjunto de los bloques de roca del talud, bien sea por una rotación alrededor de su pie o por una flexión de los propios estratos.

El vuelco de estratos es un fenómeno bastante común en todo tipo de rocas y a cualquier escala y se ha descrito tanto para taludes naturales, excavados y minas a cielo abierto.

2.1 MECANISMOS DE INESTABILIDAD POR VUELCO

El toppling es un mecanismo de fallo del talud generado por el vuelco de las columnas del mismo al interactuar unas con otras. A diferencia de lo que ocurre con otros modos de fallo en taludes rocosos, los estratos buzan hacia el interior del talud con direcciones de buzamiento opuestas.

El fallo comienza en la zona del pie del talud, debido a procesos tanto naturales (erosión natural) como provocados (una nueva excavación) produciendo que el material acabe amontonándose en el pie del mismo ocultando en cierta medida el modo de fallo.

Dentro de las características principales ya enunciadas, existen diferentes tipologías de rotura por vuelco. [2] Goodman y Bray distinguen los siguientes tipos:

- *Vuelco por flexión (Flexural toppling)*: Esta tipología se da cuando los estratos actúan como voladizos casi continuos donde solo se da una fractura parcial de los mismos. En este proceso, los estratos de menor espesor transfieren la carga a los más gruesos, generándose al pie del talud una zona llena de bloques desordenados y desorientados.

Este tipo de vuelco suele darse principalmente en pizarras, esquistos y filitas.

- *Vuelco de bloques (Block toppling)*: En esta tipología, las columnas están divididas por juntas transversales con espaciamiento relativamente grande. Los bloques del pie, más cortos, reciben la carga de vuelco de los bloques superiores mucho más largos. La base de la masa de estratos “volcadores” está mucho mejor definida en forma de escalera ascendente a medida que el talud gana en altura.

Rocas sedimentarias de pequeño espesor, calizas y areniscas así como estratos volcánicos en forma de columnas suelen presentar este tipo de vuelco.

- *Vuelco mixto (Block flexure toppling)*: Se da cuando las juntas transversales son muy numerosas y los movimientos aparentes de los bloques dan como resultado una cierta flexión de los estratos.

Pizarras intercaladas con areniscas o con sílex y calizas de pequeño espesor presentan este tipo de vuelco.

- *Vuelco secundario*: El vuelco como comportamiento predominante puede ser generado incluso en situaciones donde no sería común su aparición. Estas son las situaciones que se consideran de vuelco secundario donde el mismo se genera por otros modos de inestabilidad.

Dentro de estos modos de vuelco secundario destacan:

- Vuelco por deslizamiento en cabeza
- Vuelco por deslizamiento en la base
- Vuelco por reptación
- Vuelco por deslizamiento del pie
- Vuelco por tracción.

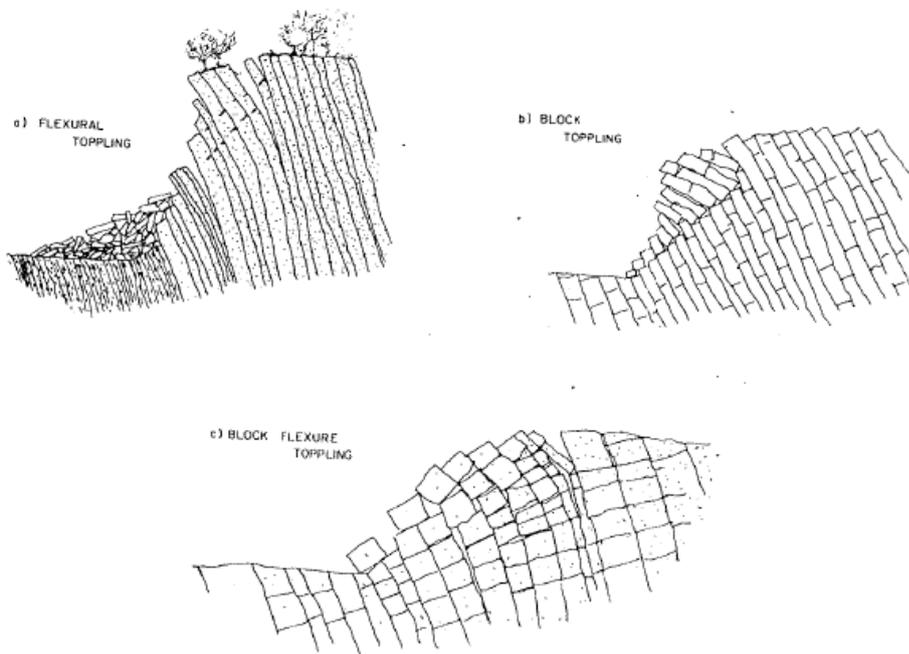


Figura N° 1- Tipos comunes de toppling

En relación al método utilizado para la hoja de cálculo y en el cual se basa el presente trabajo utiliza las consideraciones relativas al mecanismo de vuelco más general para el caso de laderas excavadas correspondiente al vuelco de bloques (b) y en menor medida el mixto (c).

A las consideraciones generales anteriores y del mismo modo que determina ^[4] Sagaseta, se añaden las siguientes características identificativas propias de estos mecanismos de vuelco:

- Se trata de un fenómeno que afecta a todo el conjunto del talud.
- La profundidad que alcanza el fenómeno es relativamente moderada, formándose una línea de charnela aproximadamente recta, a partir del pie. El vuelco únicamente afectará a los bloques situados por encima de esta línea de charnela.



- Los bloques se consideran rectangulares, formados por los propios planos de estratificación y las juntas transversales.
- Los bloques pueden ser inestables frente al vuelco, deslizamiento o un efecto combinado de ambos movimientos.
- Se producen abundantes grietas y desórdenes en el talud, todo esto debido a los giros relativos entre bloques.
- Los bloques al volcar o deslizar, se apoyan en los situados por debajo suyo y como consecuencia es la zona del pie de talud la que soporta el conjunto por lo que su resistencia tiene gran importancia.

El vuelco de estratos es un mecanismo fundamentalmente bidimensional ya que únicamente se origina cuando los rumbos de talud y estratificación son subparelos. ^[2] Goodman y Bray cifran la diferencia de rumbos en $\pm 10^\circ$ para que se pueda producir el fenómeno, aunque esto no quiere decir que bajo condiciones puntuales de disposición, estratos y geometría del talud se pueda producir el vuelco oblicuo de bloques.

2.2 MÉTODOS DE CORRECCIÓN UTILIZADOS

Los métodos de corrección más utilizados consisten en:

- Tender el talud por debajo de la línea de charnela, o ligeramente por encima buscando la estabilidad de los bloques.
- Utilización de anclajes profundos proporcionando fuerzas que hagan a los bloques estables frente a vuelco y deslizamiento.
- Bulonado sistemático, con una pequeña tensión inicial o puramente pasivos buscando un efecto de cosido entre los bloques o estratos aumentándose la resistencia tangencial entre ellos.

Entre estos tres métodos, y siempre que no existan impedimentos funcionales (existencia de edificios colindantes o estructuras sobre coronación), será el primero de ellos al que con mayor asiduidad se recurra.

3 MÉTODOS DE ANÁLISIS

En este apartado se revisarán los diferentes métodos de análisis existentes a fin de sentar unas bases claras del procedimiento utilizado en la generalización del método de [2] Goodman y Bray y su posterior aplicación como hoja de cálculo.

3.1 EQUILIBRIO DE UN BLOQUE AISLADO

Como introducción al problema, se considera la estabilidad de un bloque rectangular aislado situado sobre un plano inclinado (Figura N°2).

Este plano inclinado tiene un ángulo α respecto a la horizontal. El bloque tiene un ancho Δx , altura y , y peso w .

El primero en utilizar este modelo fue Ashby (1971) y posteriormente Hoek y Bray (1974). Las condiciones de estabilidad son:

$$\frac{\Delta x}{y} \geq \text{tg } \alpha$$

$$\text{tg } \alpha \leq \text{tg } \phi$$

De estas dos ecuaciones se extrae que si no se cumple la primera de ellas el bloque vuelca, deslizará si no se cumple la segunda y deslizará y volcará si no cumple ambas. La utilización de estas dos ecuaciones permite obtener las regiones en las que el bloque es estable, vuelca, desliza y vuelca y desliza al mismo tiempo, todo ello en función coeficiente de fricción y el ángulo del plano inclinado tal y como determinan [2] Goodman y Bray.

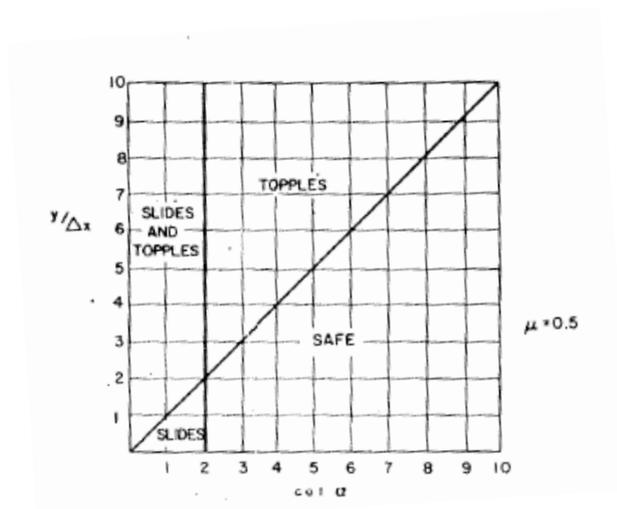
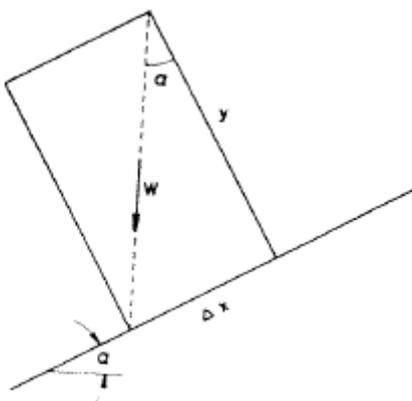


Figura N° 2- Equilibrio del bloque aislado

3.1.1 Análisis del bloque aislado

Esta extensión sin embargo no es correcta, como puede comprobarse si se analizan correctamente las condiciones de equilibrio dinámico del bloque establecidas por [5] Sagaseta.

El error proviene desde dos condiciones principalmente:

- La primera de ellas, indica que la proyección del vector peso fuera de la base del bloque no es condición suficiente para que se produzca el vuelco. Es necesario a su vez que la fuerza de fricción al pie, sea suficiente para proveer fijación en el mismo.
- Una vez se está en la condición de vuelco, el centro de rotación se sitúa al pie del bloque, por lo que el centro de gravedad del mismo experimenta cierta aceleración lineal y por tanto la fuerza resultante no es cero.

Goodman y Bray expusieron en 1981 un nuevo análisis del problema corrigiendo la solución previa. (Figura N°3)

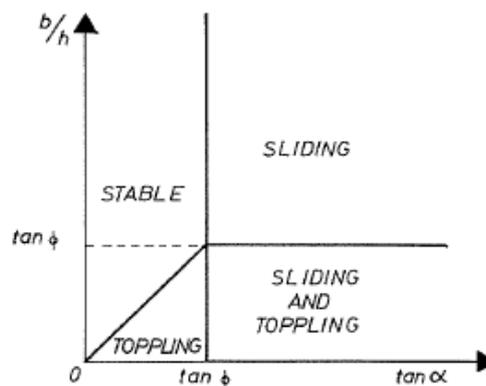


Figura N° 3- Equilibrio del bloque aislado por Goodman y Bray

Aun así esta solución únicamente resuelve parcialmente los errores antes mencionados, no siendo hasta que [5] Sagaseta definió la solución correcta estableciendo a través de ecuaciones de equilibrio dinámico de un modo general las posteriores soluciones a cada modo de fallo.

De este análisis se extrae un cambio en el límite entre las regiones de toppling con y sin deslizamiento (Figura n°4), que ahora es una curva que depende respecto al valor absoluto del valor del ángulo de fricción, reduciéndose la zona indicativa de vuelco y deslizamiento conjunto.

Es importante mencionar que estas correcciones no afectan la validez de los métodos existentes de análisis de estabilidad de taludes de roca basados en las condiciones de las ecuaciones definidas por [2] Goodman y Bray. De hecho solo se usa la parte correspondiente a la región estable y esta zona es común en todos los diagramas vistos.

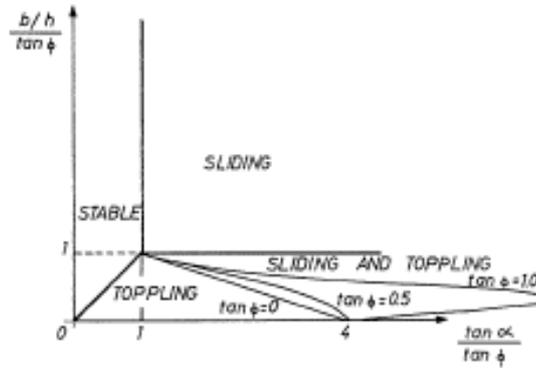


Figura N° 4- Equilibrio del bloque aislado por [5] Sagaseta.

3.2 ANÁLISIS COMO TALUD INDEFINIDO

A pesar de ser un punto de partida importante, el bloque aislado no es representativo de las condiciones reales de vuelco de los estratos en los que los bloques vuelcan y/o deslizan al interaccionar unos con otros.

En relación a este concepto, [2] Goodman y Bray establecieron que para que se produzca el vuelco, debe vencerse la fricción entre estratos. Estos autores supusieron que el estado tensional en un talud rocoso es uniaxial, donde la tensión principal mayor es paralela al talud y la menor puede suponerse nula.

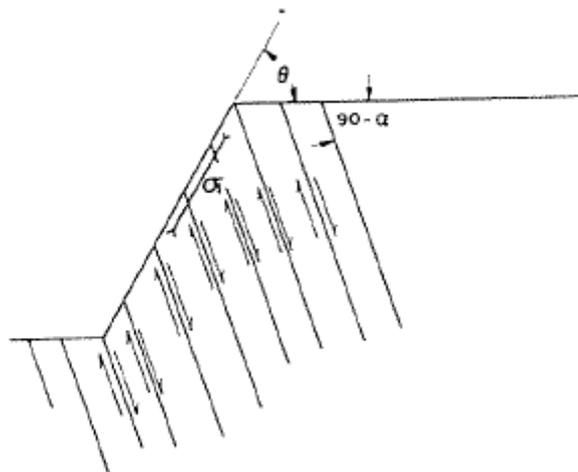


Figura N° 5- Estado tensional en el talud definido por [2] Goodman y Bray

Mediante la utilización del diagrama de Mohr, se obtienen las tensiones normal y tangencial en los planos de estratificación, proporcionales a esta tensión principal mayor paralela al talud.

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1}{2} \cdot \{1 + \cos[2(\theta - \alpha)]\}$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_1}{2} \cdot \{\sin[2(\theta - \alpha)]\}$$



Donde θ representa el ángulo del talud, α representa el complementario del buzamiento y ϕ_e el ángulo de rozamiento entre estratos.

De lo anterior, se puede extraer el conocido como criterio cinemático de [2] Goodman y Bray, al partir con ambas ecuaciones anteriores con el límite de fricción de los planos de los estratos ($\tau_\alpha \leq \sigma_\alpha \cdot \text{tg}\phi_e$).

$$\theta - \alpha \leq \phi_e$$

Del criterio cinemático anterior, se puede definir un coeficiente de seguridad al vuelco:

$$F = \frac{\text{tg}\phi_e}{\text{tg}(\theta - \alpha)}$$

Este coeficiente desde el punto de vista conceptual es correcto pues indica que a mayor ángulo de talud o buzamiento o menor ángulo de rozamiento, aumenta el riesgo de vuelco, por lo que es perfectamente válido como primera aproximación tal y como lo usan ciertos programas de cálculo de estabilidad.

3.3 EQUILIBRIO LÍMITE DE SISTEMAS DE BLOQUES

[2] Goodman y Bray presentaron un método de análisis de equilibrio límite del sistema de bloques que conforma el talud (Figura nº6) en el cual se ha basado la ejecución de la hoja de cálculo presentada en este Trabajo de Fin de Máster. Al ser el método utilizado, se ahondará en el mismo ya que de su correcta comprensión depende el entendimiento del resto del trabajo.

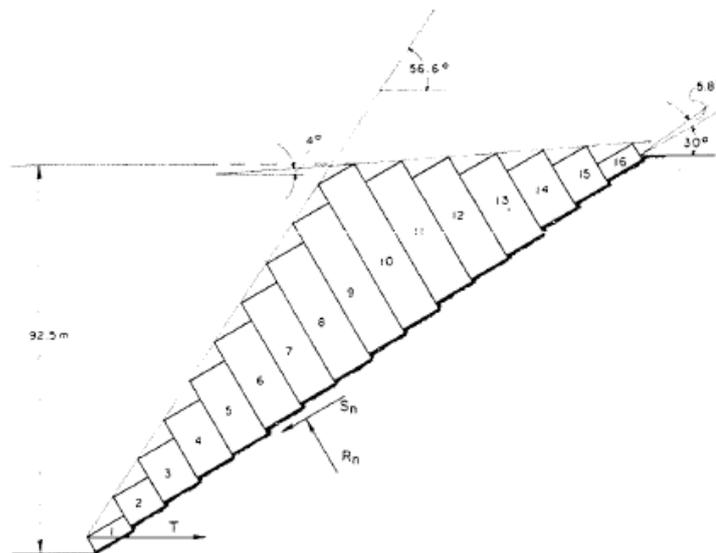


Figura Nº 6- Caso ejemplo (a) definido por [2] Goodman y Bray

Considerados el sistema regular de bloques que se observa en la figura nº 7 donde θ es el ángulo del talud excavado y los estratos buzanan $90 - \alpha$. Se considera una inclinación de la base de ángulo β . Las constantes a_1 , a_2 y b que se aprecian en la figura vienen dadas por:

$$a_1 = \Delta x \cdot \tan(\theta - \alpha)$$



$$a_2 = \Delta x \cdot \tan \alpha$$

$$b = \Delta x \cdot \tan (\beta - \alpha)$$

La numeración de los bloques es creciente desde el pie en dirección a la coronación. [2] Goodman y Bray utilizaron como ejemplo un modelo idealizado de talud de 2 tramos como el observado en la figura nº7, donde la obtención de la altura de cada uno de los bloques:

Bajo la coronación del talud:

$$y_n = n \cdot (a_1 - b)$$

Por encima de la coronación:

$$y_n = y_{n-1} - a_2 - b$$

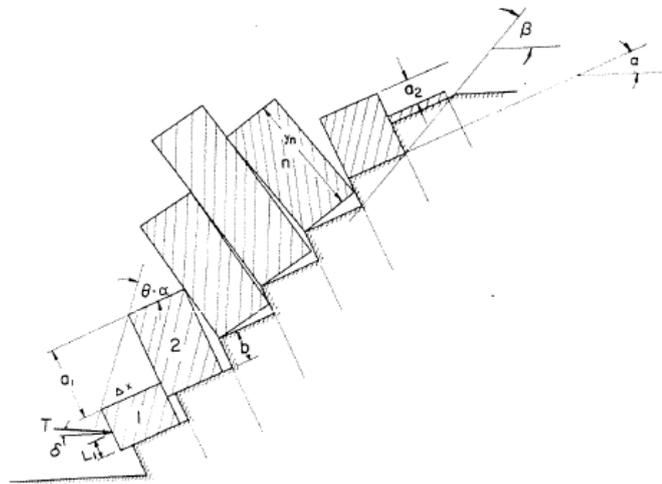


Figura Nº 7- Definición de alturas de los bloques por [2] Goodman y Bray

Un bloque cualquiera, sometido a las fuerzas que le transmite el inmediatamente superior, puede resultar estable, o apoyarse en el inmediatamente inferior quedando en equilibrio estricto al vuelco y deslizamiento. En la zona superior del talud, donde los bloques son relativamente cortos, los bloques serán estables a menos que $\alpha > \phi$. Por debajo de la zona estable, los bloques tienden a volcar, pero como ya se ha mencionado quedarán en equilibrio estricto al apoyarse sobre el inmediatamente inferior.

Si se analizan los bloques más cercanos al pie del talud, se observa como son cada vez más cortos por lo que de nuevo se satisface la condición de estabilidad y no volcarán bajo la acción de su propio peso. Aun así, estos bloques debido a las acciones que les transmiten los inmediatamente superiores (que si tienen tendencia al vuelco o al deslizamiento) pueden volcar.

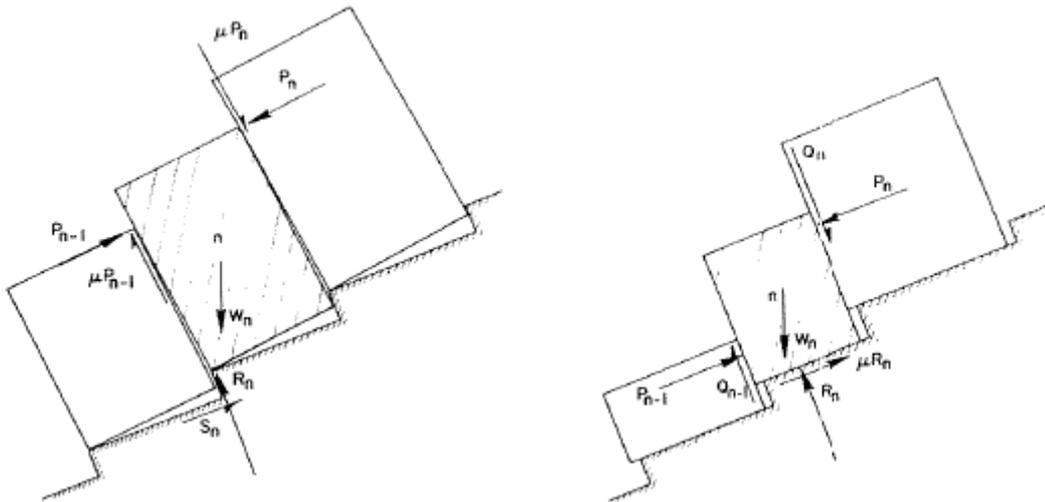


Figura N° 8- Fuerzas de interacción entre bloques en vuelco (izquierda) y deslizamiento (derecha). [2] Goodman y Bray

La fuerza mínima necesaria en el primer bloque (al pie) requerida para prevenir tanto vuelco como deslizamiento, será negativa si el talud es estable, positiva si es inestable y nula si está exactamente en el límite de equilibrio.

Es común para buscar el coeficiente de fricción requerido, iterar hasta conseguir una fuerza al pie nula, la cual determina que el talud es estable.

Condiciones de vuelco y deslizamiento.

Se observan en las figuras n°8 y n°9 las condiciones para que se dé el vuelco y deslizamiento en función de las fuerzas aplicadas en un bloque cualquiera del talud y función de las que le aplican los bloques superior e inferior al mismo. Las fuerzas en el mencionado bloque n incluyen: W_p , el peso del propio bloque, P_n y Q_n , que representan las fuerzas normal y tangencial actuando en la zona superior del bloque a una altura M_n y P_{n-1} y Q_{n-1} que representan las fuerzas normal y tangencial actuando en el lado opuesto del bloque actuando a una altura L_n . Finalmente, R_n y S_n , que se corresponden con las fuerzas normal y tangencial en la base del bloque aplicadas a una distancia k_n por encima de la esquina inferior del mismo.

Para el caso de que el bloque n tenga tendencia al vuelco, los puntos de aplicación de las fuerzas M_n y L_n se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

Por debajo de la coronación del talud:

$$M_n = y_n$$

$$L_n = y_n - a_1$$

En el bloque de coronación:

$$M_n = y_n - a_2$$

$$L_n = y_n - a_1$$

Por encima de la coronación:

$$M_n = y_n - a_2$$

$$L_n = y_n$$

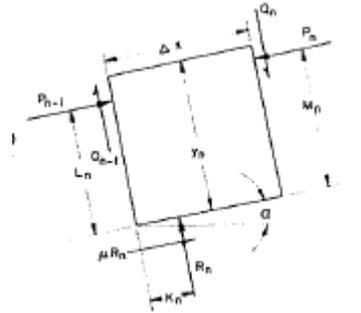


Figura N° 9- Fuerzas de interacción entre bloques y distancias respecto a la base del bloque. [2] Goodman y Bray

Para la obtención de las fuerzas transmitidas entre bloques, debido a que el número de incógnitas supera al de ecuaciones, se deben tomar como hipótesis que la fuerza entre bloques está aplicada en el punto más alto de contacto entre ellos (representados por L_n y M_n) y que se moviliza todo el ángulo de rozamiento entre estratos ϕ_e .

Por tanto existen tres incógnitas: P_{n-1} , R_n y S_n . La fuerza necesaria para prevenir el vuelco del bloque es:

$$P_{n-1,t} = \frac{P_n \cdot (M_n - \mu \Delta x) + \left(\frac{W_n}{2}\right) \cdot (Y_n \cdot \sin \alpha - \Delta x \cdot \cos \alpha)}{L_n}$$

Donde si el vuelco es crítico:

$$R_n = W_n \cdot \cos \alpha - \mu \cdot (P_{n-1,t} - P_n)$$

$$S_n = W_n \cdot \sin \alpha - (P_{n-1,t} - P_n)$$

Con la condición:

$$|S_n|/R_n \leq \mu$$

$$R_n \geq 0$$

Es común asumir en muchos casos que el coeficiente de fricción μ es el mismo tanto para el contacto bloque-base como el contacto entre bloques, modificándose fácilmente las ecuaciones anteriores para permitir distintos valores del mismo tal y como se ha tenido en cuenta en la realización de la hoja de cálculo.

Además si $S_n < 0$, la esquina inferior del bloque tiende a ir hacia arriba limitándose este movimiento por el escalonamiento de la charnela.

Si el bloque n tiende a deslizar, no se conoce el valor de las fuerzas laterales Q ni sus puntos de aplicación. Asumiendo conocidos P_n , Q_n y M_n del paso previo en el cálculo y aún quedando indeterminadas K_n , L_n , Q_{n-1} , P_{n-1} y R_n se puede obtener P_{n-1} para prevenir el deslizamiento asumiendo que $Q_{n-1} = \mu \cdot P_{n-1}$ tal y como ya se había mencionado.



Por tanto la fuerza necesaria para prevenir el deslizamiento es:

$$P_{n-1,s} = P_n \cdot \frac{W_n \cdot (\mu \cos \alpha - \sin \alpha)}{1 - \mu^2}$$

R_n viene dado mediante la misma ecuación utilizada para el vuelco sustituyendo $P_{n-1,s}$ por $P_{n-1,t}$ y $S_{n-1} = R_{n-1} \cdot \mu$

Si $P_{n-1,t} > P_{n-1,s}$ el bloque n tiende a volcar y $P_{n-1} = P_{n-1,t}$, siendo para el análisis del siguiente bloque $P_n = P_{n-1}$. Si ambos $P_{n-1,t}$ y $P_{n-1,s}$ son negativos el bloque es estable.

De esta forma se van calculando las fuerzas transmitidas entre bloques de arriba hacia abajo, llegando al pie del talud y tomando la determinación de si es estable o la fuerza necesaria para tal caso.

La charnela, deberá tener una inclinación superior a la de la línea basal (línea perpendicular a la estratificación), consiguiendo de esta manera que la charnela resulte escalonada.

Este escalonamiento limita cinemáticamente las posibilidades de inestabilidad de los bloques:

- Si un bloque es estable, el siguiente (en orden descendente) puede ser estable, volcar o deslizar. Si un bloque vuelca, el siguiente puede volcar, deslizar o ser estable.
- El deslizamiento de un bloque implica que el siguiente únicamente pueda deslizar o ser estable ya que el deslizamiento del bloque superior impide cinemáticamente el vuelco.
- La resistencia tangencial en la base de un bloque viene limitada por el rozamiento del mismo con la base siempre que el deslizamiento sea hacia abajo. Si el bloque desliza hacia arriba (debido a su vuelco), la resistencia tangencial no tiene límite debido al escalonamiento de la charnela el cual proporciona la resistencia horizontal necesaria.

3.4 ANÁLISIS TENSODEFORMACIONAL

Los métodos de equilibrio límite son los más usados para el análisis. Eso no es razón para que en ocasiones se hayan empleado métodos tensodeformacionales.

Se pueden utilizar programas de elementos finitos para el análisis del vuelco de estratos que utilizan elementos junta para las diaclasas. Debido al gran número de juntas intervinientes y los grandes desplazamientos existentes entre bloques su utilidad es limitada y por ello no son muy usados.

Por otro lado están los programas de diferencias finitas, los cuales, tienen una utilidad únicamente relativa ya que sus resultados coinciden casi exactamente con los resultados de equilibrio límite que son mucho más sencillos de obtener. Sin embargo, estos son los únicos programas que permiten en sus versiones más sofisticadas el estudio del vuelco por flexión y su tránsito a bloques (Figura N°1), incorporando la fisuración progresiva de los estratos.

También existen métodos de elementos discretos completos, que resuelven las ecuaciones de rigidez del sistema de partículas de forma global y cuya limitación principal es la dimensión de la matriz de rigidez resultante, pero al tratarse en el vuelco de estratos con un número de bloques no muy elevado, son métodos aptos para este uso, aunque aún no se hayan usado para el mismo.

3.5 APLICACIÓN PRÁCTICA

Una vez vistos los posibles métodos de evaluación de la estabilidad de un talud y a modo de resumen se indican los dos únicos métodos que suelen utilizarse comúnmente como aplicación práctica en la evaluación de la estabilidad de taludes, no nombrándose el método de ^[2] Goodman y Bray al haber sido ya explicado en el punto anterior.

3.5.1 Criterio cinemático de ^[2] Goodman y Bray

De fácil aplicación pero utiliza condiciones alejadas de la realidad, lo que se visualiza al compararlo con otros métodos. Esta comparativa arroja que no se trata de una condición de estabilidad, sino que, que el coeficiente F (Apdo.3.2) no separa la zona estable de la inestable.

Esto queda de manifiesto si se comparan los tres casos ejemplos ofrecidos por ^[2] Goodman y Bray donde, si se representa la relación fuerza necesaria al pie ($K_t = T \cdot [1/2\gamma H]$) y F se aprecia que únicamente se con un coeficiente de 1,5 donde la fuerza necesaria al pie se hace nula (Figura N°10).

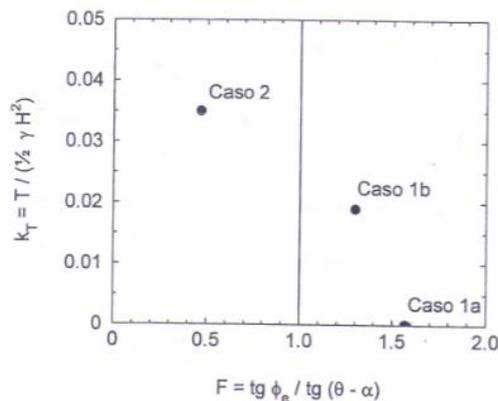


Figura N° 10- Gráfica comparativa de fuerza necesaria al pie y el factor de seguridad ^[4] Sagaseta

3.5.2 Ábacos de Zanbak (1953)

Presentan las limitaciones de cualquier ábaco por la necesaria reducción del rango de variables para reducir los resultados a un número manejable de gráficos.

La limitación de mayor importancia es el tomar un ángulo de rozamiento igual a 35 ° tanto en estratificación como en juntas, no siendo posible la variación de este importante parámetro en la utilización de estos ábacos.

Por otra parte, la elección de variables también es poco afortunada, ya que el parámetro adimensional que define la carga P_l^* tiene un rango de variación demasiado grande y varía de manera significativa al variar el espesor de los estratos (H/t). Sin embargo, P_l^* debe luego multiplicarse por t^2 para obtener carga absoluta, por lo que la influencia de (H/T) disminuye.



$$P_l^* = \frac{P_l}{\gamma \cdot t^2}$$

Donde:

P_l : Fuerza al pie

t: Espesor de estratos

Por último, también merece la pena comentar lo referente a la dirección de la fuerza estabilizadora al pie P_l , la cual se supone con una dirección igual a las fuerzas entre bloques, es decir, inclinada un ángulo ϕ_e . Esta orientación es muy desfavorable para un anclaje, y si se usa otra orientación es preciso hacer una transformación de componentes.

3.6 SOLUCIÓN TEÓRICA, ANÁLISIS CONTINUO

Los tres ejemplos definidos por [2] Goodman y Bray cubren todas las posibilidades de vuelco, deslizamiento y estabilidad de los bloques. Sin embargo, los autores no determinan que factores son los que producen este paso de un modo de fallo al otro.

Entre los factores principales que producen este proceso se encuentra el espesor de los estratos. Por tanto con este espesor se puede definir un parámetro denominado esbeltez al vuelco:

$$\lambda = H/t$$

Siendo H la altura del talud y t el espesor de los estratos. Si se representan gráficamente el caso de un mismo talud de 50° con rozamiento en la estratificación de 35° y 30° en las juntas, con una charnela situada 5° sobre la línea base y solo variándose el buzamiento (65° frente a 80°).

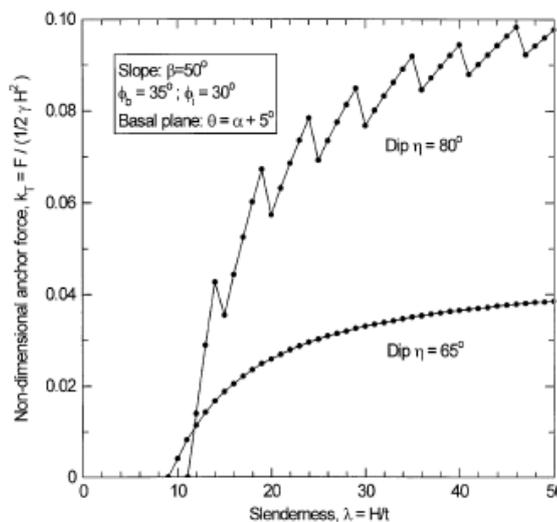


Figura N° 11- Gráfica comparativa de fuerza al pie en función de la esbeltez [3] Sagaseta

Se ven dos consecuencias importantes. La primera de ellas es la dificultad de hacer análisis con modelos discontinuos. Por otro lado, muestra que la influencia de la esbeltez pierde importancia salvo en un rango



muy estrecho, que en el caso de la figura nº11 se da para esbelteces superiores a 20, donde ya la fuerza al pie es prácticamente independiente de la esbeltez al vuelco.

Esta situación hace que una solución basada en esbeltez infinita, es decir, tendiendo a cero el espesor de estratos sea de utilidad práctica ([3] Sagaseta)

Se trata del análisis del equilibrio límite de un sistema de bloques como el que realizan [2] Goodman y Bray pero con espesor diferencial de los bloques.

3.6.1 Planteamiento.

En la siguiente figura se muestra el caso general abordado por el autor, donde la estratificación tiene buzamiento ψ (línea base $\alpha = 90 - \psi$). La altura de los bloques es $h(x)$, diferencia entre la superficie del terreno h_t y la charnela h_c . La base de los bloques siempre esta con una inclinación α . Se consideran los ángulos de rozamiento ϕ_e en la estratificación y ϕ_b en las juntas base.

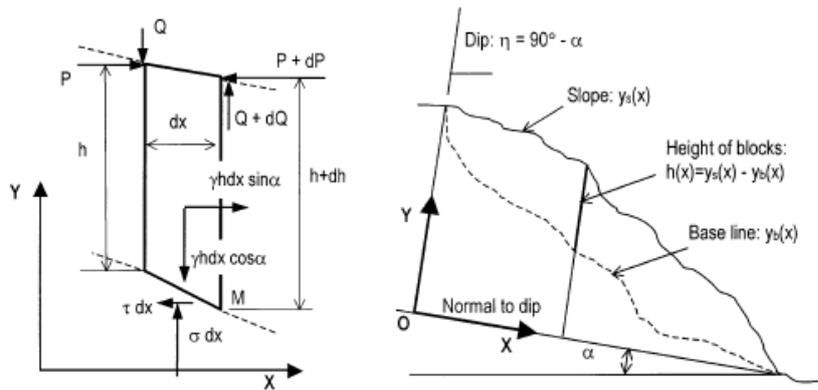


Figura Nº 12- Geometría adoptada en el análisis continuo ([3] Sagaseta)

Manteniendo las hipótesis del método de [2] Goodman y Bray sobre la movilización de fricción entre los bloques, las condiciones de equilibrio de fuerzas de un bloque diferencial dan lugar a:

$$\frac{dp}{dx} + \tau = \gamma \cdot h \cdot \sin \alpha$$

$$\operatorname{tg} \phi_e \cdot \frac{dp}{dx} + \sigma = \gamma \cdot h \cdot \cos \alpha$$

y del equilibrio de momentos:

$$h \cdot \frac{dp}{dx} + (\operatorname{tg} \phi_e - \eta) \cdot p = \frac{1}{2} \gamma \cdot h^2 \cdot \sin \alpha$$

donde: $\eta = -dh_t / dx$ (pendiente del terreno respecto a la línea base (con x decreciente))



De la integración de la ecuación para el caso del vuelco se obtiene $p(x)$ y de la utilización de condición de fricción en la base ($\tau/\sigma = \text{tg}\phi_b$) para la deslizamiento se llega a la ecuación diferencial para p siguiente.

$$\frac{dp}{dx} = \gamma \cdot h \cdot \frac{\text{tg}\alpha - \text{tg}\phi_b}{1 - \text{tg}\phi_b \cdot \text{tg}\phi_e}$$

La integración de las ecuaciones anteriores depende de la geometría del problema. De hecho el autor realiza la integración para un caso general consistente en un talud recto de dos tramos.



4 APLICACIÓN GENERAL DEL MÉTODO DE GOODMAN Y BRAY A CUALQUIER GEOMETRÍA DE TALUD, ANCLAJES Y EXISTENCIA DE NIVEL FREÁTICO.

Analizadas los posibles métodos de evaluación de estabilidad de taludes, explicando de manera más detallada el Método de ^[2]Goodman y Bray en el cual se basa este trabajo, se procede a detallar la aplicación general del mismo detallando las hipótesis tomadas para la posterior realización de la hoja de cálculo.

4.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GOODMAN Y BRAY A CUALQUIER GEOMETRÍA DE TALUD

^[2] Goodman y Bray establecieron un método desarrollado para su ejecución en un talud indefinido de 2 tramos (Figura N°6)

Toda la formulación recogida en su publicación de 1976 estaba referida a un talud de estas características. De esas ecuaciones, la utilización de una geometría diferente (variación del número de tramos del talud) únicamente influye en las correspondientes a altura de los bloques y puntos de aplicación de las cargas en los mismos.

4.1.1 Objetivo

Como puede observarse, es necesario a fin de poder abrir el espectro de evaluación de casos, la posibilidad de aplicar el método a casos geoméricamente más complejos que el presentado por ambos autores y que es el único desarrollado por los programas comerciales actuales. Es por ello, que el primer objetivo ha sido la ejecución de una formulación gemela a la utilizada por ^[2] Goodman y Bray pero para casos de hasta 6 tramos de talud a fin de que el usuario que utilice la hoja de cálculo pueda resolver casos geoméricamente más complejos.

4.1.2 Planteamiento utilizado

Para la definición geométrica, se ha seguido un planteamiento en base a relaciones trigonométricas en las que los datos conocidos son la altura de los taludes (h), el ángulo de los mismos ($^\circ$), el ángulo de buzamiento de las discontinuidades, el ángulo de la línea base respecto a la horizontal y el ángulo entre la línea basal y la charnela.

Los cálculos trigonométricos utilizados pueden ser visualizados en el punto 4.1.3 correspondiente al anexo de cálculos geométricos.

Como ejemplo del proceso, se utilizará el caso de talud con 4 tramos, de manera que sea sencillo visualizar el proceso de cálculo llevado a cabo para adaptar la nueva geometría al método de ^[2] Goodman y Bray.

Obtención de las alturas de los bloques y el nº real de bloques.

La obtención del número de bloques, espesor y altura de los bloques sigue el mismo patrón independientemente del caso (número de tramos) a evaluar.

[2] Goodman y Bray establecieron en sus ejemplos la hipótesis de espesor de estrato constante, hipótesis que no será aplicada a fin de cumplir con las condiciones geométricas asociadas al talud. Esto se debe a la necesidad de ajustar el número de bloques entre dos cambios de pendiente de manera que entren físicamente (figura nº13)

En este proceso, inicialmente se obtiene a partir del valor de espesor de estrato definido por el usuario un número de bloques. Del espesor medio obtenido (dividiendo el $AE''/\Delta x$ para el caso de talud de 4 tramos, véase la figura nº13) al que se le denominará “espesorreal” se irán obteniendo los distintos espesores de cada tramo de tal manera que en cada uno de ellos sea un número entero de bloques el que ocupe el espacio.

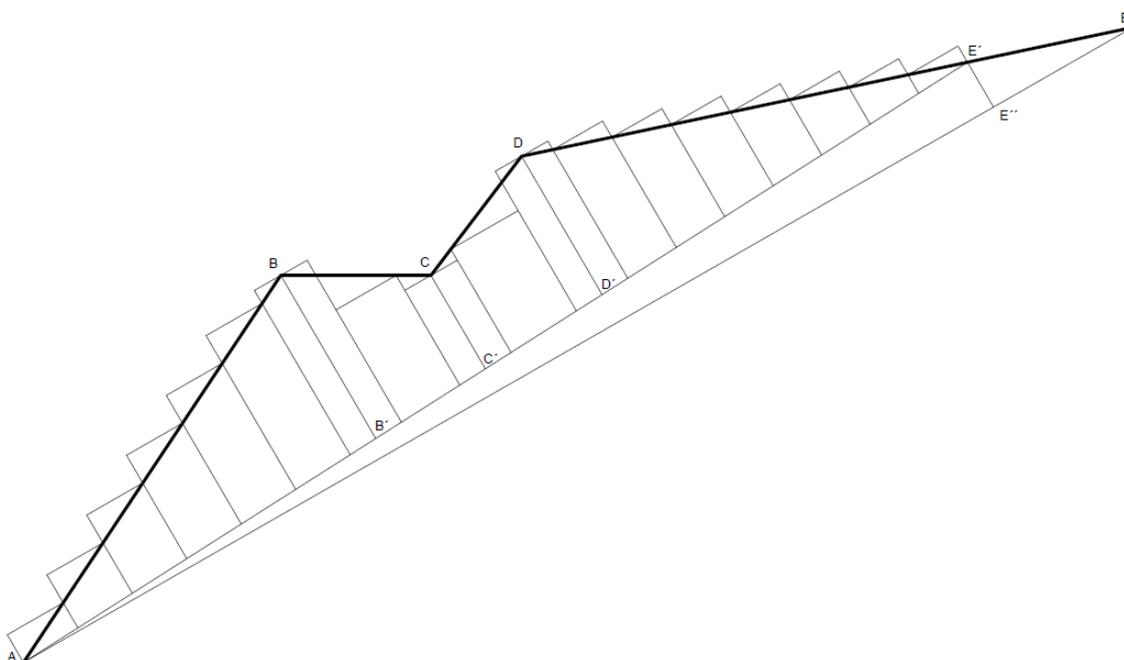


Figura Nº 13- Distribución de bloques por los diferentes tramos

La obtención del número de bloques, espesores y alturas es un proceso en el que se toman las siguientes hipótesis de cálculo:

- Se considera que los bloques situados en las aristas del talud (puntos B,C y D en la figura nº13) tienen el espesor medio obtenido en el primer cálculo (es decir, tienen espesor = “espesorreal”)
- Cada uno de los tramos medidos sobre la línea base (perpendicular a los estratos) tendrá una longitud igual a la restante de restarle la parte proporcional del estrato correspondiente a las aristas y de espesor = “espesorreal”. Así para los tramos exteriores (inicial y final) a cada segmento se le restará la mitad de este espesor y a los tramos interiores el total del mismo.



- Las alturas de los bloques situados en las aristas (puntos B,C y D en la figura nº13) coinciden con la máxima o mínima altura medida de manera perpendicular (esta perpendicular está medida desde la línea base) desde la línea de charnela hasta la propia arista.

Tras estas consideraciones, y restados los tramos mencionados, se divide la longitud restante entre “espesorreal” y se obtiene el número entero más cercano de bloques. Volviendo a dividir el espacio restante entre este número de bloques obtenido se obtendrá el espesor medio de estrato de este tramo.

Tanto este espesor obtenido como el número de bloques servirán para la obtención de las variables “a” y “b” necesarias para la obtención de la altura de los bloques y los puntos de aplicación de las cargas entre bloques.

Como ejemplo de lo dicho la obtención de estas variables para el primer tramo de talud (tramo AB) sería:

$$a_1 = \text{Tan}(\theta_1 - \alpha) \cdot \text{Espesorbloque}_{AB''}$$

$$b_{AB''} = B'B'' / (\text{número de bloques}_{AB''})$$

Tras la obtención de estas variables, la obtención de la altura de los bloques se realiza de manera iterativa y decreciente en la que se parte desde la arista de mayor restando o sumando las variables “a” y “b” según sea necesario, es decir:

Para el ya mencionado caso de 4 tramos de talud.

Altura de los bloques del tramo AB:

Se parte de la altura de bloque correspondiente a la arista B, en concreto al segmento BB´.

$$y_{n-1} = y_n - a_1 + b_{AB''}$$

Donde en el primer bloque (bloque de la arista B) $a_1 = \text{Tan}(\theta_1 - \alpha) \cdot \text{Espesorbloque}_{aristaB}$ (a_{11} en la figura nº15)

Este proceso iterativo se realizara un número de veces $n = (\text{número de bloques}_{AB''})$

Altura de los bloques en los tramos BC y CD:

Para el tramo BC, se vuelve a partir de la altura de bloque correspondiente a la arista B, en concreto al segmento BB´(figura nº13), mientras que para el tramo CD se parte de una altura correspondiente al segmento CC´. En ambos tramos, y en todo tramo intermedio caben dos posibilidades. En el caso particular del tramo BC.

Que la altura de los bloques aumente, con lo que la expresión de obtención de altura de los bloques será:

$$y_{n+1} = y_n + a_2 - b_{B''C''}$$

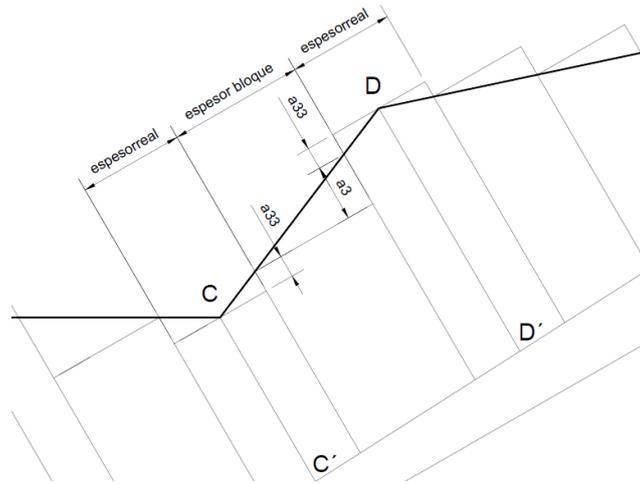


Figura N° 14- Aumento de altura de los bloques en tramo intermedio (caso tramo CD)

Que la altura de los bloques disminuya, con lo que la expresión de obtención de altura de los bloques será:

$$y_{n+1} = y_n - a_2 - b_{B''C''}$$

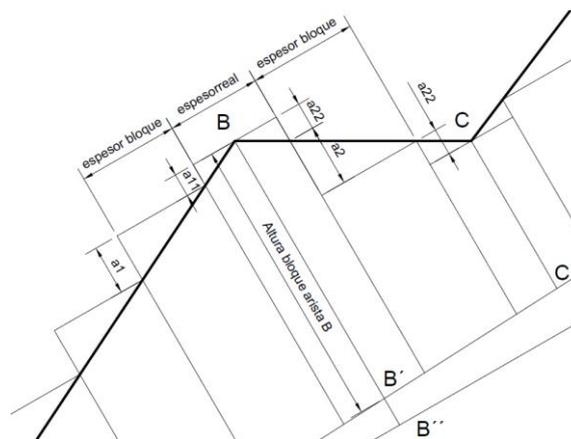


Figura N° 15- Aumento de altura de los bloques en tramo intermedio

En ambos casos, el a_2 inicial (a_{22} y a_{33} en las figuras) y del último bloque se corresponde con un espesor de estrato igual a “espesorreal” añadido al correspondiente al a_2 o a_3 propio del tramo. El número de iteraciones a realizar será igual al número de bloques obtenido en los procesos iterativos anteriores.

Altura de los bloques del tramo DE:

En este caso, la altura de los bloques siempre será decreciente, por lo tanto es un proceso similar al del tramo AB.

En este caso particular, se parte desde una altura de bloque DD' (Véase anexo 4.1.3) obteniéndose el valor de la altura de cada bloque de manera descendente hasta llegar al número de bloques que entran en el tramo.

$$y_{n+1} = y_n - a_4 - b_{D''E''}$$

Donde al igual que en resto de tramos, a_4 (en la figura aparece como a_{44}) en la primera iteración se obtiene con $\text{espesor} = \text{espesorreal}$.

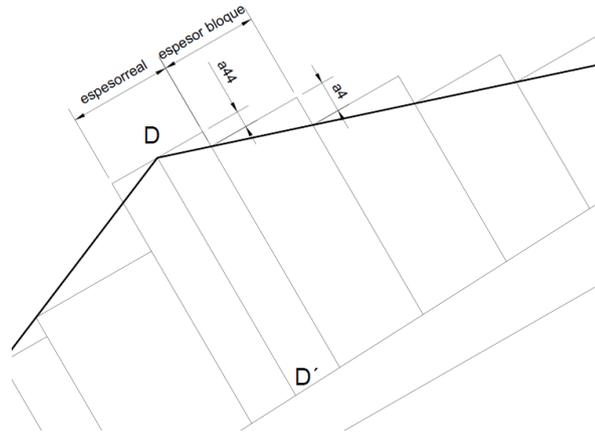


Figura N° 16- Disminución de altura de los bloques en tramo final

Finalmente, una vez se obtienen el número de bloques que entran realmente en todo el talud, se ajusta el número de bloques añadiendo o restando algún bloque en el último tramo si fuese necesario.

Este proceso, se va complicando a medida que aumentan el número de tramos, pero mantiene el concepto definido anteriormente.

Obtención del valor $y_n / \Delta x$ (espesor del bloque)

El proceso es el mismo que utilizan ^[2] Goodman y Bray en sus tres ejemplos. Obtenidas las alturas de los bloques, únicamente se debe dividir cada una de las alturas por el espesor correspondiente a cada bloque obtenido en el proceso anterior.

Obtención de los valores M_n y L_n

La obtención de estos valores sigue el mismo proceso que el descrito para el caso origen de ^[2] Goodman y Bray, pero en este caso deben respetarse los valores “a” y “b” obtenidos tanto para los bloques situados en las aristas (y que tienen espesor igual a “espesorreal”) como los valores de “a” y “b” definidos para cada uno de los tramos. Además, se deben tener en cuenta las características propias de los bloques de los tramos interiores que cambian en cierta manera su configuración respecto a los externos.

Respecto a la situación origen de ^[2] Goodman y Bray existe otra peculiaridad que merece mención especial. Esta es el caso en el que si existe un bloque situado en una de las aristas del talud al cual lleguen dos pendientes negativas (formando una v) este bloque tendrá valores de M_n y L_n iguales y correspondientes a su altura.



Obtención de los valores $P_{n,s}$, $P_{n,t}$ y P_n

El procedimiento de obtención de las cargas necesarias para estabilizar los bloques frente al deslizamiento o el vuelco sigue el mismo proceso que el que usan [2] Goodman y Bray en sus ejemplos.

Únicamente se distingue en el cálculo a la hora de usar los espesores de los estratos, utilizándose para cada estrato su espesor correspondiente a diferencia del caso origen de los autores que se mantenía constante.

Obtención de los valores R_n y S_n

El proceso de obtención de las resultantes R_n y S_n sigue el mismo proceso del caso origen comentado anteriormente. La única diferencia radica al igual que en los procesos anteriores en tener que utilizar el espesor correspondiente a cada bloque el cual va variando en cada uno de los tramos y si el bloque elegido se corresponde con alguno de los situados en las aristas del talud.

4.1.3 Anexo de cálculos geométricos

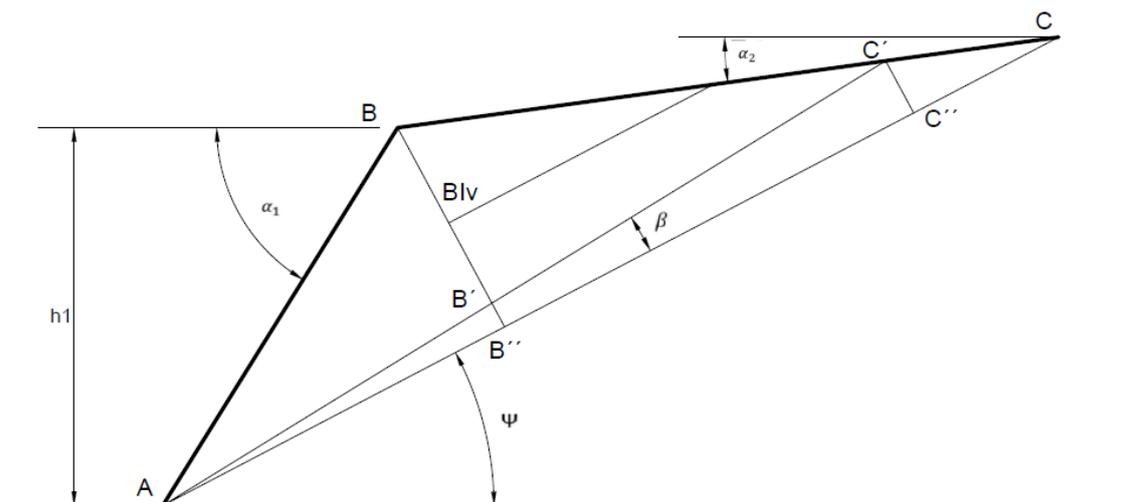


Figura N° 17- Geometría para el caso de talud de dos tramos

$$AB = h1 / \sin \alpha_1$$

$$AB'' = \cos (\alpha_1 - \Psi) \cdot AB$$

$$B'B'' = \operatorname{tg} \beta \cdot AB''$$

$$BB'' = \operatorname{tg} (\alpha_1 - \Psi) \cdot AB''$$

$$B''C = \frac{BB''}{\operatorname{tg} (\Psi - \alpha_2)}$$

$$BC = \frac{BB''}{\sin (\Psi - \alpha_2)}$$

$$B'B'' = \operatorname{tg} \beta \cdot AB''$$

$$AC = AB'' + B''C$$

$$C''C = \frac{\operatorname{tg} \beta \cdot AC}{\operatorname{tg} (\Psi - \alpha_2) + \operatorname{tg} \beta}$$

$$AC'' = AC - C''C$$

$$C'C'' = \operatorname{tg} (\Psi - \alpha_2) \cdot C''C$$

$$AC' = \frac{AC''}{\cos \beta}$$

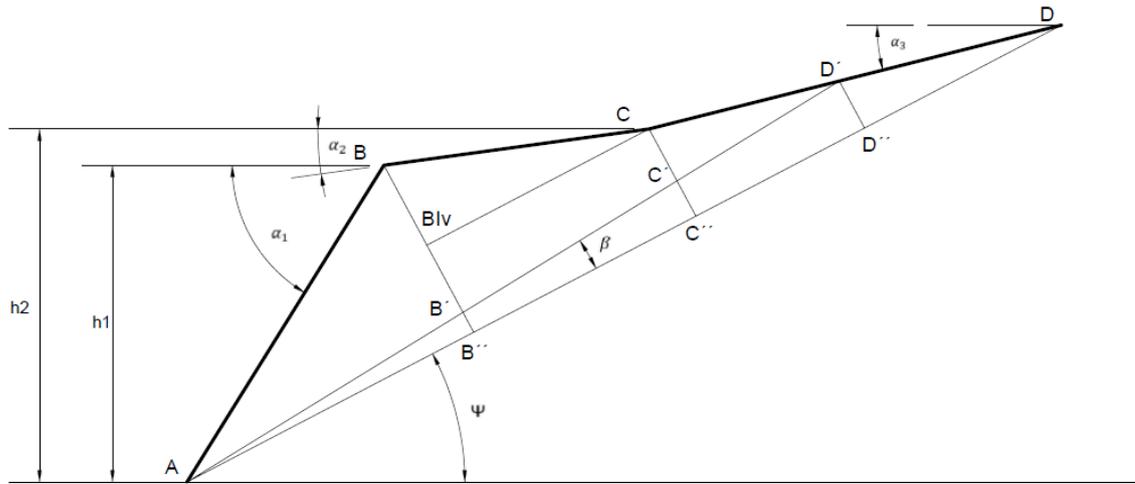


Figura N° 18- Geometría para el caso de talud de tres tramos

$$\begin{aligned}
 AB &= h1 / \sin\alpha_1 & AB'' &= \cos(\alpha_1 - \Psi) \cdot AB & B'B'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot AB'' \\
 BB'' &= \operatorname{tg}(\alpha_1 - \Psi) \cdot AB'' & *BC &= \frac{(h2-h1)}{\sin\alpha_2} & B''C'' &= \cos(\Psi - \alpha_2) \cdot BC \\
 B'B'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot AB'' & BB^{IV} &= \operatorname{tg}(\Psi - \alpha_2) \cdot B''C'' & B^{IV}B'' &= CC'' = BB'' - BB^{IV} \\
 C'C'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot (AB'' + B''C'') & C'D &= \frac{CC''}{\operatorname{tg}(\Psi - \alpha_3)} & AD &= AB'' + B''C'' + C'D \\
 D'D &= \frac{\operatorname{tg}(\beta) \cdot AD}{\operatorname{tg}(\beta) + \operatorname{tg}(\Psi - \alpha_3)} & D'D'' &= \operatorname{tg}(\Psi - \alpha_3) \cdot D'D & AD'' &= AD - D'D
 \end{aligned}$$

* En caso de que α_2 sea nulo (talud horizontal) el usuario será el que defina la longitud de ese tramo.

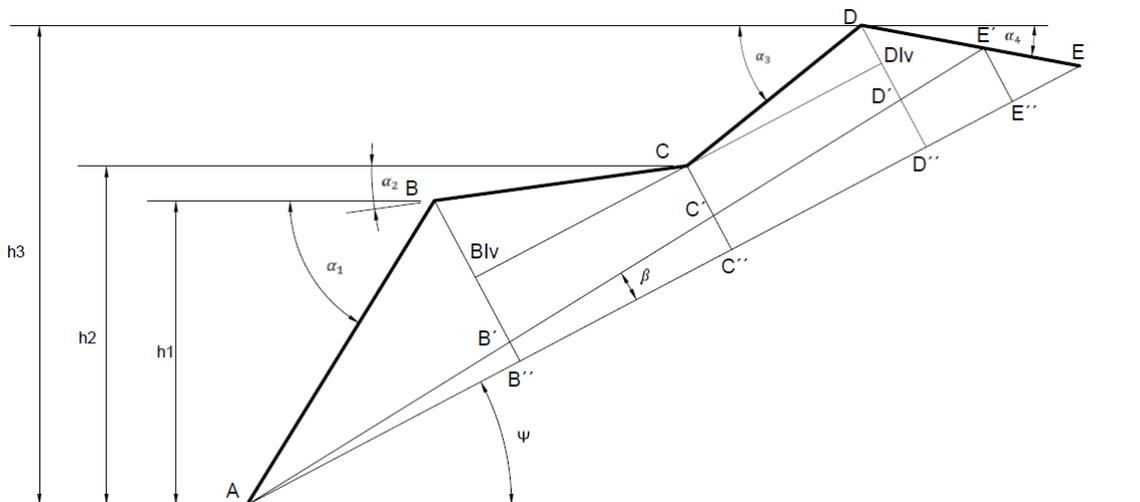


Figura N° 19- Geometría para el caso de talud de cuatro tramos



$$\begin{aligned}
 AB &= h_1 / \sin \alpha_1 & AB'' &= \cos (\alpha_1 - \Psi) \cdot AB & B'B'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot AB'' \\
 BB'' &= \operatorname{tg} (\alpha_1 - \Psi) \cdot AB'' & *BC &= \frac{(h_2 - h_1)}{\sin \alpha_2} & B''C'' &= \cos (\Psi - \alpha_2) \cdot BC \\
 B'B'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot AB'' \\
 BB^{IV} &= \operatorname{tg} (\Psi - \alpha_2) \cdot B''C'' & B^{IV}B'' &= CC'' = BB'' - BB^{IV} & C'C'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot (AB'' + B''C'') \\
 *CD &= \frac{(h_3 - h_2)}{\sin \alpha_3} & CC^{IV} &= \sin (\Psi - \alpha_3) \cdot CD & DD'' &= CC'' - CC^{IV} \\
 C^{IV}D &= C''D'' = \cos (\Psi - \alpha_3) \cdot CD & & & D'E &= \frac{DD''}{\operatorname{tg} (\Psi - \alpha_4)} \\
 AE &= AB'' + B''C'' + C''D'' + D'E \\
 E'E &= \frac{\operatorname{tg} (\beta) \cdot AE}{\operatorname{tg} (\beta) + \operatorname{tg} (\Psi - \alpha_4)} & E'E'' &= \operatorname{tg} (\Psi - \alpha_4) \cdot E'E & AD'' &= AB'' + B''C'' + C''D'' \\
 D'D'' &= AD'' \cdot \operatorname{tg} \beta & AE'' &= AE - E'E & CC' &= CC'' - C'C'' \\
 DD' &= DD'' - D'D'' & D'E'' &= D'E - E'E & AE' &= \frac{AE''}{\cos \beta}
 \end{aligned}$$

* En caso de que α_2 o α_3 sean nulos (talud horizontal) el usuario será el que defina la longitud de ese tramo.

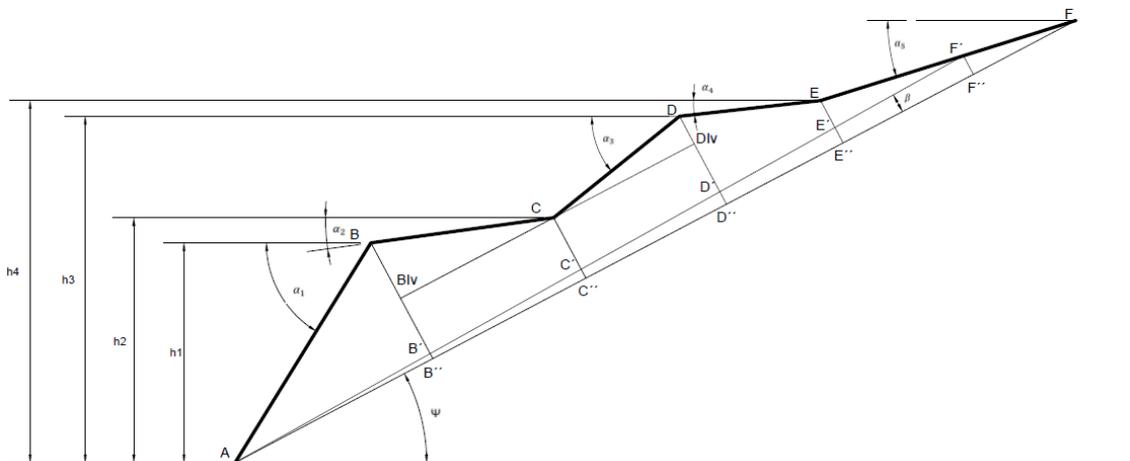


Figura N° 20- Geometría para el caso de talud de cinco tramos

$$\begin{aligned}
 AB &= h_1 / \sin \alpha_1 & AB'' &= \cos (\alpha_1 - \Psi) \cdot AB & B'B'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot AB'' \\
 BB'' &= \operatorname{tg} (\alpha_1 - \Psi) \cdot AB'' & *BC &= \frac{(h_2 - h_1)}{\sin \alpha_2} & B''C'' &= \cos (\Psi - \alpha_2) \cdot BC \\
 B'B'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot AB'' \\
 BB^{IV} &= \operatorname{tg} (\Psi - \alpha_2) \cdot B''C'' & B^{IV}B'' &= CC'' = BB'' - BB^{IV} & C'C'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot (AB'' + B''C'')
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 *CD &= \frac{(h3-h2)}{\sin\alpha_3} & CC^{IV} &= \sin(\Psi - \alpha_3) \cdot CD & DD'' &= CC'' - CC^{IV} \\
 C^{IV}D &= C'D'' = \cos(\Psi - \alpha_3) \cdot CD & *DE &= \frac{(h4-h3)}{\sin\alpha_4} & DD^{IV} &= \sin(\Psi - \alpha_4) \cdot DE \\
 EE'' &= DD'' - DD^{IV} & D'E'' &= \cos(\Psi - \alpha_4) \cdot DE \\
 E'E'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot (AB'' + B''C'' + C'D'' + D'E'') & E'F &= \frac{EE''}{\operatorname{tg}(\Psi - \alpha_5)} \\
 AF &= AB'' + B''C'' + C'D'' + D'E'' + E'F & F'F &= \frac{\operatorname{tg}(\beta) \cdot AF}{\operatorname{tg}(\beta) + \operatorname{tg}(\Psi - \alpha_5)} \\
 F'F'' &= \operatorname{tg}(\Psi - \alpha_5) \cdot F'F & AD'' &= AB'' + B''C'' + C'D'' \\
 D'D'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot AB'' & AF'' &= AF - F'F & CC' &= CC'' - C'C''
 \end{aligned}$$

* En caso de que α_2, α_3 o α_4 sean nulos (talud horizontal) el usuario será el que defina la longitud de ese tramo.

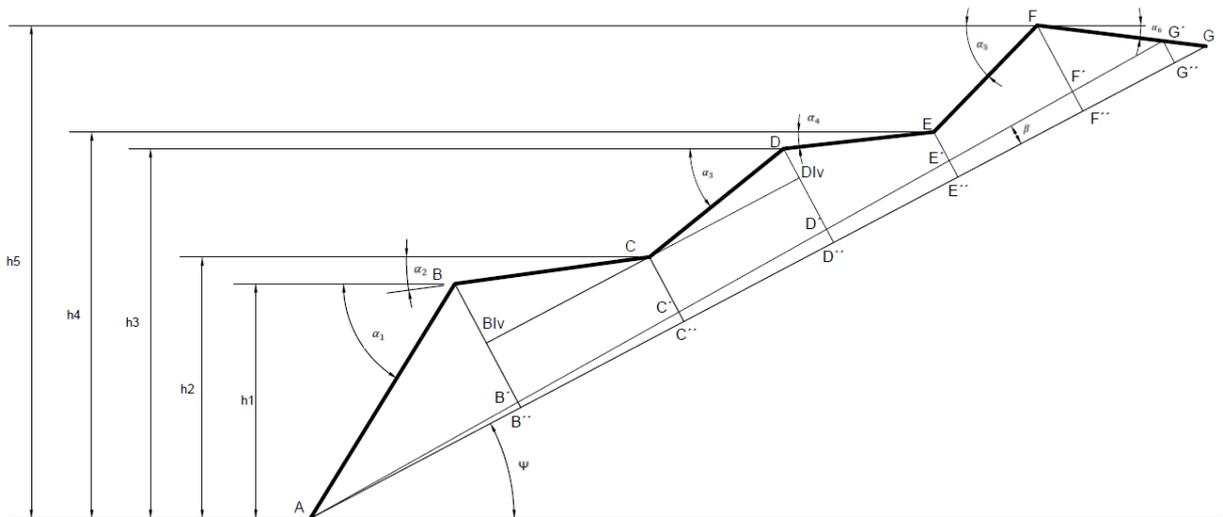


Figura N° 21- Geometría para el caso de talud de seis tramos

$$\begin{aligned}
 AB &= h1 / \sin\alpha_1 & AB'' &= \cos(\alpha_1 - \Psi) \cdot AB & B'B'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot AB'' \\
 BB'' &= \operatorname{tg}(\alpha_1 - \Psi) \cdot AB'' & *BC &= \frac{(h2-h1)}{\sin\alpha_2} & B''C'' &= \cos(\Psi - \alpha_2) \cdot BC \\
 B'B'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot AB'' \\
 BB^{IV} &= \operatorname{tg}(\Psi - \alpha_2) \cdot B''C'' & B^{IV}B'' &= CC'' = BB'' - BB^{IV} & C'C'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot (AB'' + B''C'') \\
 *CD &= \frac{(h3-h2)}{\sin\alpha_3} & CC^{IV} &= \sin(\Psi - \alpha_3) \cdot CD & DD'' &= CC'' - CC^{IV} \\
 C^{IV}D &= C'D'' = \cos(\Psi - \alpha_3) \cdot CD & *DE &= \frac{(h4-h3)}{\sin\alpha_4} & DD^{IV} &= \sin(\Psi - \alpha_4) \cdot DE \\
 EE'' &= DD'' - DD^{IV} & D'E'' &= \cos(\Psi - \alpha_4) \cdot DE & *EF &= \frac{(h5-h4)}{\sin\alpha_5} \\
 E'E'' &= \operatorname{tg} \beta \cdot (AB'' + B''C'' + C'D'' + D'E'') & EE' &= EE'' - E'E''
 \end{aligned}$$



$$EE^{IV} = EF \cdot \sin(\Psi - \alpha_5) \qquad FF'' = EE'' - EE^{IV} \qquad E''F'' = EF \cdot \cos(\Psi - \alpha_5)$$

$$F''F'' = \operatorname{tg} \beta \cdot (AB'' + B''C'' + C''D'' + D''E'' + E''F'') \qquad F''G = \frac{FF''}{\operatorname{tg}(\Psi - \alpha_6)}$$

$$FF' = FF'' - F''F'' \qquad AG = AB'' + B''C'' + C''D'' + D''E'' + E''F'' + F''G$$

$$G''G = \frac{\operatorname{tg}(\beta) \cdot AG}{\operatorname{tg}(\beta) + \operatorname{tg}(\Psi - \alpha_6)} \qquad F''G'' = F''G - G''G \qquad G'G'' = \tan(\Psi - \alpha_6) * G''G$$

$$AG'' = AB'' + B''C'' + C''D'' + D''E'' + E''F'' + F''G'' \qquad AG' = \frac{AG''}{\cos(\beta)}$$

* En caso de que $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ o α_5 sean nulos (talud horizontal) el usuario será el que defina la longitud de ese tramo.

4.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GOODMAN Y BRAY A CUALQUIER GEOMETRÍA DE TALUD Y CORRECCIÓN MEDIANTE USO DE ANCLAJES

[2] Goodman y Bray determinan en sus ejemplos la opción de introducir un cable que permita prevenir tanto el vuelco como el deslizamiento. En base a este ejemplo se ha aplicado esta colocación de cable para las distintas geometrías analizadas en el punto 4.1

Los autores únicamente determinan la opción de colocar el cable en el bloque 1 (pie de talud), sin embargo, se ha creído oportuno al disponerse de geometrías de varios tramos, la opción de colocar el cable en cualquier plano inclinado del talud.

4.2.1 Objetivo

Es por tanto el objetivo de este módulo de programa la posibilidad de introducción de varias fuerzas a modo de anclaje permitiendo una estabilización del talud. Este módulo permitirá al usuario la introducción de hasta 5 filas de anclajes, con su correspondiente fuerza por unidad de longitud y ángulo de inclinación.

Se permitirá esta utilización hasta el caso de 5 tramos de talud (5 tramos incluidos) no siendo posible la utilización del módulo para el último de los casos.

4.2.2 Planteamiento utilizado

La obtención de todos los parámetros necesarios para el cálculo de la estabilidad del talud sigue el mismo patrón que para el caso de no utilizar cable. La obtención del número de bloques, sus alturas y el punto de aplicación de las cargas entre bloques no varía respecto al cálculo anterior.

Obtención del bloque en el que se sitúa el anclaje y las distancias correspondientes a sus componentes de momento estabilizador del bloque.



Una vez obtenido el número de bloques y las alturas de los mismos se debe buscar el bloque sobre el que será aplicada la fuerza de anclaje.

Para eso, el usuario debe definir respecto al pie de talud a que altura se sitúa el mismo a fin de que mediante cálculos trigonométricos se ajuste sobre que bloque se aplica la fuerza y a que distancia respecto a la base del bloque está situada.

La obtención del bloque a partir de la altura definida por el usuario sigue el siguiente proceso:

- En primer lugar se buscará la altura correspondiente de cada bloque respecto al pie de talud. Para ello hay que distinguir entre las zonas de tramo inicial y final y los intermedios, ya que el proceso de obtención de altura de los bloques es diferente al estar los bloques intermedios expuestos a la hipótesis de que tendrán la máxima y mínima altura definidas en la geometría del talud (Veáse figura nº13).

Los tramos intermedios cambian la configuración de obtención de altura respecto a los extremos a fin de obtener las alturas definidas para los bloques de los cambios de pendiente (aristas A, B, C...)

- Finalizada la obtención de esta altura, se verifica la posición exacta del anclaje. Esta posición, se obtiene de manera distinta para los casos de tramos extremos e intermedios a consecuencia de la hipótesis anterior.

Primer tramo de talud

La obtención de la altura del bloque respecto al pie de talud para el primer talud se realiza de la siguiente manera:

Se obtiene la longitud de talud de ese tramo (del segmento AB), correspondiente a cada bloque en función del espesor de cada uno de ellos.

$$L_{\text{bloquearista}} = \frac{\text{espesorreal} \cdot 0.5}{\cos(\alpha_1 - \Psi)}$$

$$L_{\text{bloque segmento AB}} = \frac{(AB - L_{\text{bloquearista}})}{n^{\circ} \text{ bloques AB}}$$

Posteriormente se obtiene la altura a restar para cada uno de ellos

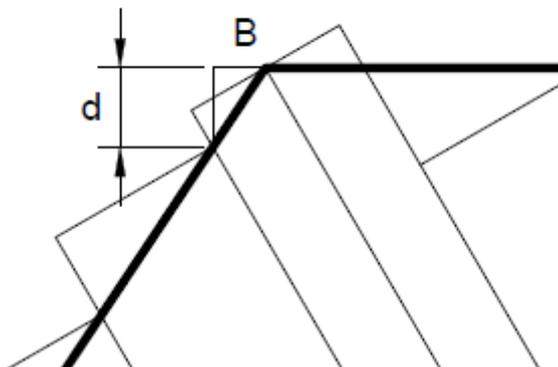


Figura Nº 22- Geometría para el caso de talud de cinco tramos

$$d_{\text{bloquearista}} = L_{\text{bloquearista}} \cdot \cos (90 - \alpha_1)$$

$$d_{\text{bloquesegmentoAB}} = L_{\text{bloquesegmentoAB}} \cdot \cos (90 - \alpha_1)$$

Obtenidas estas distancias, únicamente se deben ir restando las mismas teniendo como punto de partida la altura del talud h_1 .

Para el caso del primer bloque de arista (el situado en B) el anclaje se encontrará situado en el mismo siempre que su altura medida desde el pie de talud se encuentre entre h_1 y $(h_1 - d_{\text{bloquearista}})$.

Para el resto de los bloques es el mismo concepto utilizando $d_{\text{bloquesegmentoAB}}$ en lugar de $d_{\text{bloquearista}}$.

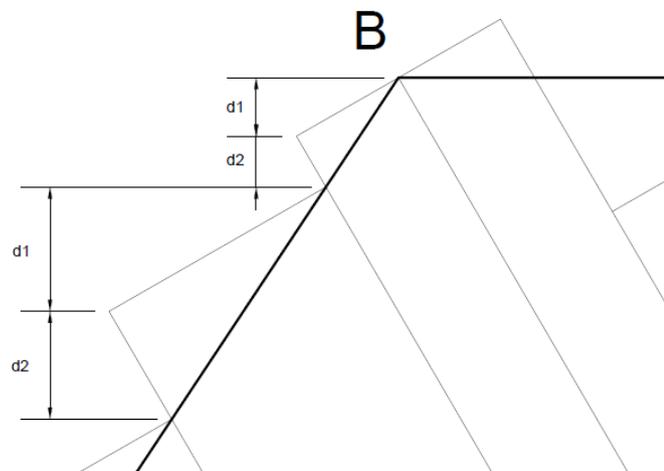


Figura N° 23- Posibles puntos de aplicación del anclaje en cada bloque

En cuanto a la posición que puede tener el anclaje en el bloque, existen dos posibles puntos de aplicación variando sensiblemente el efecto del mismo.

- Si el anclaje se sitúa dentro del rango de alturas definido por d_1 (Figura n°23) se considera que la componente paralela a la fuerza necesaria para estabilizar el bloque respecto al vuelco o deslizamiento está situada en la máxima altura del bloque (alt). Además, existe una distancia hasta el punto de giro (o) del bloque respecto a donde se aplica la componente vertical del anclaje (L_{base}) (Figura N°24)

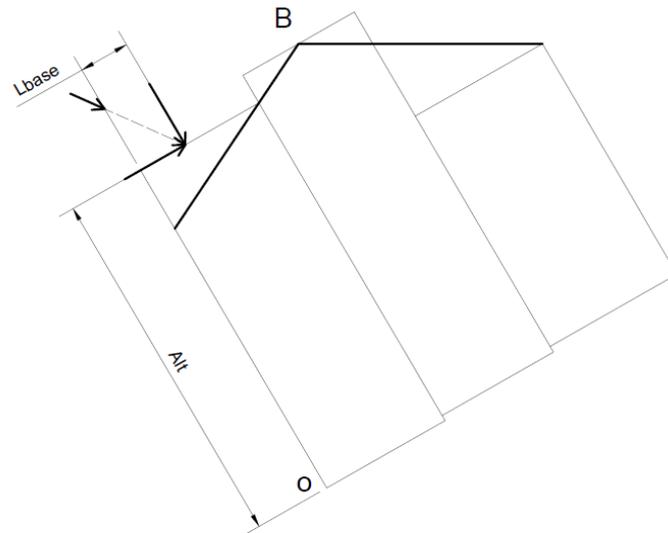


Figura N° 24- Distancias al centro de giro de las componentes del anclaje

Por otro lado, si se sitúa dentro del rango definido como d_2 únicamente generara momento estabilizador su componente paralela a las fuerzas necesarias para estabilización. La distancia variará en función de la altura elegida para el anclaje, siendo como máximo de valor igual a la altura del bloque y como mínimo igual a la altura del bloque menos la componente a_1 del tramo.

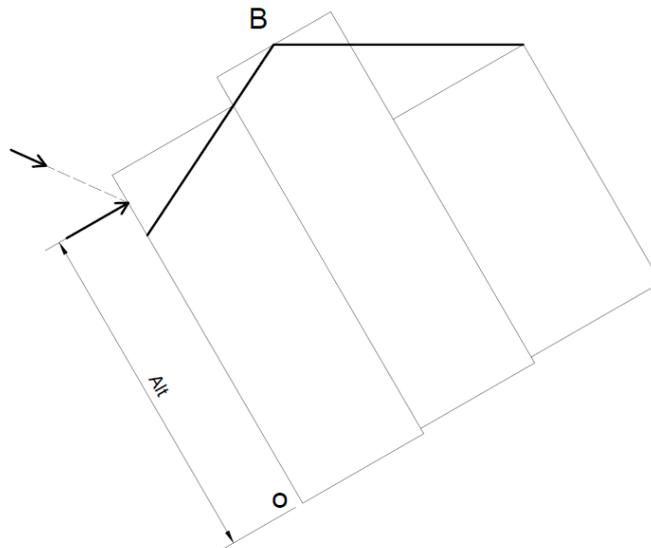


Figura N° 25- Distancia a centro de giro del anclaje por aplicación en la zona d_2

Se debe recordar que los cálculos para obtener d_1 variarán dependiendo de si se trata del bloque situado en arista o los posteriores bloques.

Tramos intermedios de talud

La utilización de una geometría diferente para estos casos conlleva la utilización de un modo en cierta manera diferente de abordar la obtención del bloque de aplicación del anclaje y sus distancias hasta la base del mismo.

La obtención de las alturas de los bloques sigue un planteamiento muy similar al del primer tramo pero puntualizando ciertos elementos.



En primer lugar se obtiene la longitud del segmento de talud a analizar para posterior dividirlo en función del número de bloques.

$$L_{\text{bloquearista}} = \frac{\text{espesorreal} \cdot 0.5}{\cos(\Psi - \alpha_3)}$$

$$L_{\text{bloquesegmentoCD}} * = \frac{(CD - L_{\text{bloquearista}} \cdot 2)}{n^{\circ} \text{ bloques CD}}$$

*Se ha utilizado como ejemplo aclaratorio un segmento denominado como CD, siendo los cálculos análogos para el resto de tramos intermedios.

Obtenidas las componentes para los bloques de arista e intermedios, se procede a obtener los rangos de alturas entre los que están situados cada uno de los bloques.

$$d_{\text{bloquearista}} = L_{\text{bloquearista}} \cdot \cos(90 - \alpha_3)$$

$$d_{\text{bloquesegmentoCD}} = L_{\text{bloquesegmentoCD}} \cdot \cos(90 - \alpha_3)$$

Para el primer bloque, es decir el situado en la arista:

$$y_n = h_3 - (d_{\text{bloquearista}} + (d_{\text{bloquesegmentoCD}} - R_1))$$

Donde

$$R_1 = \text{espesorC'D''} \cdot \sin(\Psi)$$

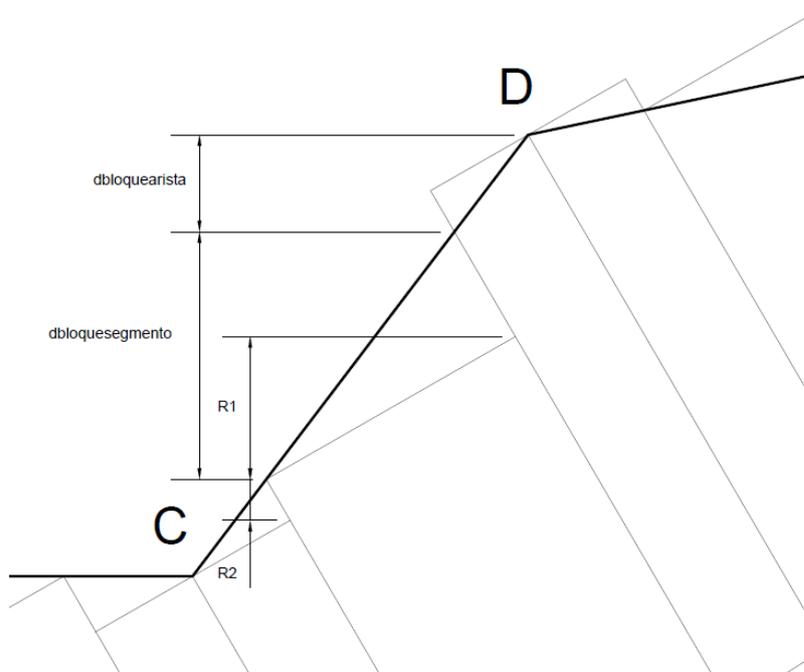


Figura N° 26- Obtención de las alturas de cada bloque para el uso de anclajes

Por tanto, en este caso si el anclaje está situado entre el rango de alturas h_3 y y_n , estará aplicado en el bloque correspondiente a la arista D.



En cuanto a su situación de aplicación dentro del bloque, al igual que en el tramo anterior puede estar situado dentro del rango de alturas definido por d_1 (véase figura nº23) o dentro del rango definido como d_2 variando por tanto el número de componentes del anclaje que participan a la hora de generar carga y momento estabilizador.

$$d_1 = \text{espesorreal} \cdot 0,5 \cdot \text{sen}(\Psi)$$

Para el caso de los bloques sucesivos, la obtención del rango de alturas se define como:

$$y_{n1} = y_n - R_1 - a_3 \cdot \text{cos}(\Psi)$$

Siendo a_3 correspondiente a espesorreal al llegar al último bloque del tramo (previo a la arista)

Por tanto, el bloque n del tramo, tendrá un rango de alturas posibles entre y_n e y_{n1} , siendo $y_n = y_{n1}$ para los bloques sucesivos.

Para estos bloques, es válido igualmente lo argumentado anteriormente de los rangos de altura definidos como d_1 y d_2 .

En caso de que el bloque de aplicación se sitúe por debajo del rango de altura y_{n1} del último bloque del tramo, es decir, el previo a la arista, el bloque de aplicación será el correspondiente a la misma, con distancia al punto de giro igual a la altura del bloque para la componente paralela a las fuerzas entre bloques y la definida como L_{base1} al igual que en el resto de casos

Tramo final.

La geometría para la obtención de la altura de los bloques es diferente en este caso que en los tramos intermedios anteriormente expuestos.

A fin de ser coherentes con las hipótesis de alturas de los bloques tomadas, la obtención de bloque de aplicación del anclaje en esta zona sigue un proceso diferente al de los otros tramos. En este, se evaluarán los rangos de altura de los bloques en orden ascendente en lugar de descendente, partiendo desde la altura del bloque de última arista hasta el bloque situado en la intersección del talud y la línea de charnela.

El proceso, para un talud definido como DE es el siguiente:

En primer lugar se divide el segmento DE' en tramos acordes a cada uno de los bloques del tramo al igual que se ha hecho para los tramos anteriores.

$$L_{bloquearista} = \frac{\text{espesorreal} \cdot 0,5}{\text{cos}(\Psi - \alpha_4)}$$

$$L_{bloquesegmentoDE} = \frac{(DE' - L_{bloquearista})}{n^\circ \text{ bloques DE}}$$

Por lo que la altura del siguiente bloque se obtiene de:

$$d_{bloquearista} = L_{bloquearista} \cdot \text{cos}(90 - \alpha_4)$$

$$d_{bloquesegmentoDE} = L_{bloquesegmentoDE} \cdot \text{cos}(90 - \alpha_4)$$

Además, se debe tener en cuenta la proyección de los bloques al estar situados de tal manera que su altura no coincide con su altura calculada en el punto anterior, si no que esta es superior. Por tanto se le debe sumar una altura $d1_{bloquearista}$ y $d1_{bloquesegmentoDE}$ (Figura nº 27)

$$d1_{bloquearista} = [L_{bloquearista} \cdot \text{Sen}(\Psi - \alpha_4)] \cdot \cos(\Psi)$$

$$d1_{bloquesegmentoDE} = [L_{bloquesegmentoDE} \cdot \text{Sen}(\Psi - \alpha_4)] \cdot \cos(\Psi)$$

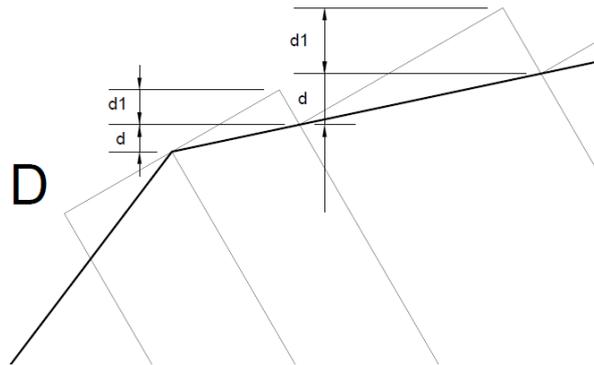


Figura Nº 27- Obtención de las alturas de cada bloque para el uso de anclajes en el último tramo

Respecto a las distancias respecto al punto de giro de las dos proyecciones del anclaje, la paralela a las fuerzas de estabilización necesarias para los bloques, en todos los bloques tendrá valor igual a la altura del bloque, mientras que la de la proyección vertical (perpendicular a la base) tendrá como máximo el espesor del bloque considerado (Figura nº28)

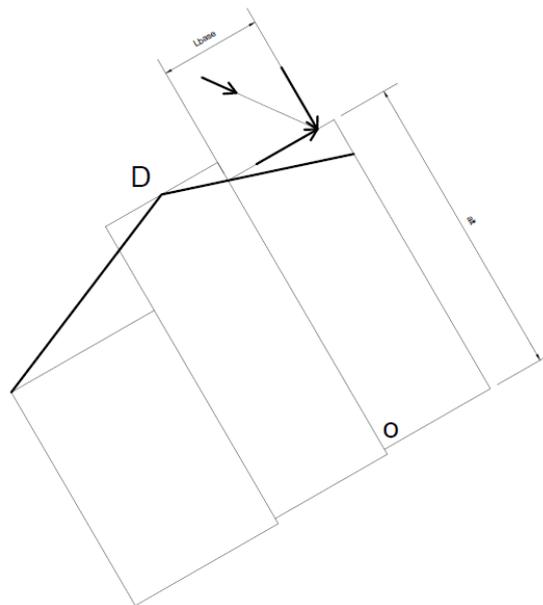


Figura Nº 28- Obtención de las alturas de cada bloque para el uso de anclajes en el último tramo



Obtención de las fuerzas necesarias para estabilizar el bloque frente al vuelco ($P_{n-1,t}$) y deslizamiento ($P_{n-1,s}$) teniendo en cuenta la influencia de los anclajes.

La obtención de las fuerzas necesarias para estabilizar los bloques siguen el mismo modelo utilizado para el caso sin uso de anclajes añadiendo las componentes propias de los mismos al cálculo.

La fuerza necesaria para estabilizar un bloque frente al vuelco:

$$P_{n-1,t} = \frac{P_n \cdot (M_n - \mu \Delta x) + \left(\frac{W_n}{2}\right) \cdot (Y_n \cdot \sin \alpha - \Delta x \cdot \cos \alpha) - T \cdot \cos(\delta + \Psi) \cdot \text{alt} - T \cdot \sin(\delta + \Psi) \cdot \text{Lbase}}{L_n}$$

Donde:

alt = Distancia entre la componente paralela a la fuerza P_n y el punto de giro del bloque.

Lbase = distancia entre la componente perpendicular a la base y el punto de giro del bloque.

δ = Ángulo del anclaje respecto a la horizontal

Δx = Espesor del bloque

Ψ = Ángulo de la línea base con la horizontal

La fuerza necesaria para estabilizar un bloque frente al deslizamiento:

$$P_{n-1,s} = P_n - \frac{W_n \cdot (\mu \cos \alpha - \sin \alpha) + T \cdot \cos(\delta + \Psi) + T \cdot \sin(\delta + \Psi) \cdot \mu}{1 - \mu^2}$$

Obtención de las resultantes R_n y S_n

La obtención de estas componentes sigue el mismo proceso que el descrito anteriormente, pero teniendo en cuenta las componentes propias del anclaje.

$$R_n = W_n \cdot \cos \alpha - \mu \cdot (P_{n-1,t} - P_n) + T \cdot \sin(\delta + \Psi)$$

$$S_n = W_n \cdot \sin \alpha - (P_{n-1,t} - P_n) - T \cdot \cos(\delta + \Psi)$$

4.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GOODMAN Y BRAY A CUALQUIER GEOMETRÍA DE TALUD Y EXISTENCIA DE NIVEL FREÁTICO

El objetivo fundamental es permitir el cálculo mediante el Método de ^[2]Goodman y Bray pero añadiendo la influencia de un nivel freático al cálculo.

Al tratarse de un cálculo previo a la inestabilidad, se considera que el talud no es autodrenante por lo que puede ser tomada en cuenta es opción.



4.3.1 Planteamiento utilizado

La ejecución del cálculo teniendo en cuenta la existencia de un nivel freático varía respecto a la original en que cada uno de los bloques afectados por este estará sometido a la acción de fuerzas del agua generando un mayor desequilibrio del mismo.

Es por ello, que la tarea previa al cálculo es la obtención de a que altura se encuentra el nivel freático respecto a la base de cada uno de los bloques.

Obtención de la altura del nivel freático respecto a la base de cada bloque

La obtención de la altura del nivel freático en cada uno de los bloques se realiza partiendo de los datos conocidos por el usuario, como son, distancia respecto a pie de talud (horizontal) y profundidad del nivel freático en ese punto (figuras nº30 y nº31).

Será necesario dar dos puntos para el caso en que se vaya a realizar el cálculo con dos tramos de talud, o tres para el caso de tres tramos.

El proceso utilizado para obtener estas alturas es idéntico al utilizado para sacar las alturas de los bloques definidos en el punto 4.1 variando únicamente las componentes asociadas al cálculo de los mismos y atendiendo la geometría del nivel freático a la formulación del anexo del punto 4.3.2 .

La obtención de estas alturas respecto a la base de cada bloque, al igual que para el caso de la geometría propia del talud, varía en función de si se está en el primer tramo, tramo intermedio y tramo final, pero sigue idéntico planteamiento al utilizado anteriormente.

Es por esto que únicamente se puntualizarán ciertas cuestiones que se consideran relevantes en este cálculo.

- El nivel freático pasa en todos los casos por el pie de talud.
- Se ha considerado que los bloques situados en las aristas del talud, tienen una altura del nivel freático definida mediante los segmentos $B_{nf}B'$ y $C_{nf}C'$ (Anexo 4.3.2), de tal manera que estas alturas sean máximas o mínimas alturas de nivel freático en los bloques correspondientes a esas aristas según se ha definido en la obtención geométrica.
- La obtención de cada una de las alturas de nivel freático en los bloques sigue un proceso análogo al usado en la obtención de las alturas de los bloques en los casos de diferentes geometrías variando únicamente los valores θ (que se corresponden a la geometría del nivel freático) y por tanto los valores de “a”.

El resto de valores (nº de bloques, espesor de los estratos, valor de la variable “b”) son valores obtenidos en la previa definición de alturas de los bloques (Apdo. 4.1)

Se detalla a continuación el proceso de obtención de la altura del nivel freático en cada uno de los bloques.

Altura del nivel freático en los bloques del tramo inicial (Tramo AB):

Se parte de la altura del nivel freático correspondiente a la arista B, en concreto al segmento $B_{nf}B'$.



$$y_{n-1} = y_n - a_{1nf} - b_{AB''}$$

Donde en el primer bloque (bloque de la arista B) $a_{1nf} = \text{Tan}(\theta_{1nf} - \alpha) * \Delta x_{\text{esporreal}}$

Este proceso iterativo se realizara un número de veces $n = (\text{número de bloques}_{AB''})$

Altura del nivel freático en los bloques del tramo intermedio (Tramo BC en caso de usar 3 tramos):

Se vuelve a partir de la altura de bloque correspondiente a la arista B, en concreto al segmento $B_{nf}B'$ pero en este tramo caben dos posibilidades:

- 1) Que la altura del nivel freático respecto a la base de los bloques aumente, con lo que la expresión será:

$$y_{n+1} = y_n + a_{2nf} - b_{B''C''}$$

- 2) Que la altura del nivel freático respecto a la base de los bloques disminuya, con lo que la expresión será:

$$y_{n+1} = y_n - a_{2nf} - b_{B''C''}$$

En ambos casos, el a_2 inicial y del último bloque se corresponde con un espesor de estrato igual a “esporreal” añadido al correspondiente al a_{2nf} propio del tramo en el primero de ellos. El número de iteraciones a realizar será igual al número de bloques obtenido en los procesos iterativos anteriores.

Altura del nivel freático en los bloques del tramo final (Tramo CD en caso de usar 3 tramos):

En este caso, la altura del nivel freático en los bloques siempre será decreciente, por lo tanto es un proceso similar al del tramo AB.

En este caso particular, se parte desde una altura de bloque $C_{nf}C'$ obteniéndose el valor de la altura del nivel freático en cada bloque de manera descendente hasta llegar al número de bloques que entran en el tramo.

$$y_{n+1} = y_n - a_{3nf} - b_{C''D''}$$

Donde al igual que en resto de tramos, a_{3nf} en la primera iteración se obtiene con espesor = esporreal.

Obtención de la altura del nivel freático en cada uno de los lados del bloque.

Es necesaria la obtención de las alturas del nivel freático a cada uno de los lados de los bloques, a fin de establecer claramente las fuerzas actuantes sobre cada uno de ellos.

El esquema de fuerzas actuantes en un bloque debida al efecto de este nivel freático, es el establecido en la figura nº29, de tal modo que se procede a exponer el proceso de obtención de estas alturas.

El planteamiento es muy similar al utilizado por ^[2] Goodman y Bray a la hora de obtener los puntos de actuación de las fuerzas entre bloques L_n y M_n , pero con cierta variación.

La obtención de estas alturas, que se denominarán h_{izq} y h_{der} (en clara alusión a la altura a la izquierda del bloque y a la derecha del mismo) al igual que para el resto de elementos es dependiente del tramo en el que se sitúa el bloque a analizar distinguiéndose el tramo inicial, tramos intermedios y tramo final.



Tramo inicial

En este tramo cuya obtención de geometrías de bloques se ha definido en puntos anteriores la obtención de las alturas h_{izq} y h_{der} se da de la siguiente manera.

Para el bloque situado en la arista B:

$$h_{izq} = h_{nfB} - a_{1nf}$$

Donde a_{1nf} tiene como espesor de cálculo el espesor del bloque de la arista B.

Para el caso de la altura derecha el cálculo se da de la siguiente manera en caso de que el nivel freático ascienda con relación a su altura en los bloques.

$$h_{der} = h_{nfB} + a_{2nf}$$

Donde si este desciende.

$$h_{der} = h_{nfB} - a_{2nf}$$

Donde a_{2nf} tiene como espesor de cálculo el espesor del bloque de la arista B.

Para los bloques del tramo AB restantes:

$$h_{der} = h_{nfbloque}$$

$$h_{izq} = h_{nfbloque} - a_{1nf}$$

Tramo BC

Para el bloque situado en la arista C:

$$h_{der} = h_{nfC} - a_{3nf}$$

Donde a_{3nf} tiene como espesor de cálculo el espesor del bloque de la arista C.

Si el nivel freático venía de un ascenso desde B hasta C ($C_{nf}C' > B_{nf}B'$):

$$h_{izq} = h_{nfC} - a_{2nf}$$

En caso de que el nivel freático estuviese en descenso ($C_{nf}C' < B_{nf}B'$):

$$h_{izq} = h_{nfC} + a_{2nf}$$

Donde a_{2nf} tiene como espesor de cálculo el espesor del bloque de la arista C.

Para los bloques restantes del tramo BC. En caso de ascenso desde B hasta C del nivel freático ($C_{nf}C' > B_{nf}B'$):

$$h_{der} = h_{nfbloque} + a_{2nf}$$

$$h_{izq} = h_{nfbloque}$$



Para los bloques restantes del tramo BC. En caso de ascenso desde B hasta C del nivel freático ($C_{nf}C' < B_{nf}B'$):

$$h_{der} = h_{nf\text{bloque}}$$

$$h_{izq} = h_{nf\text{bloque}} + a_{2nf}$$

En el tramo final:

$$h_{der} = h_{nf\text{bloque}} - a_{3nf}$$

$$h_{izq} = h_{nf\text{bloque}}$$

Obtención de las fuerzas aplicadas por la acción del agua en los bloques.

Tal y como muestra la figura nº29, existen 4 fuerzas aplicadas en cada bloque a considerar por la acción del nivel freático.

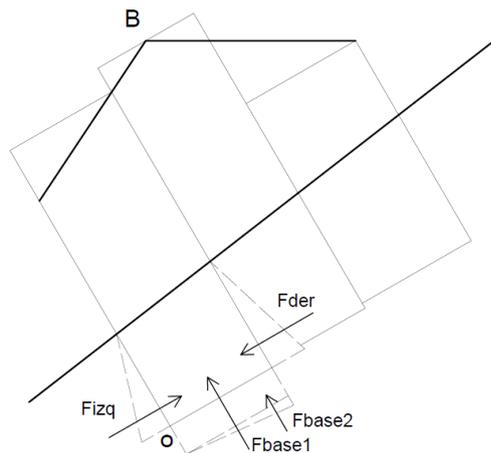


Figura Nº 29- Fuerzas actuantes por bloque debido a la acción del nivel freático

Las dos correspondientes a las caras laterales de los bloques

$$F_{der} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_{der}^2}{2}$$

$$F_{izq} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_{izq}^2}{2}$$

Las dos componentes correspondientes a la base del bloque

$$F_{base1} = \rho \cdot g \cdot h_{menor} \cdot \Delta x_{bloque}$$

$$F_{base2} = \rho \cdot g \cdot (h_{der} - h_{izq}) \cdot \frac{\Delta x_{bloque}}{2}$$



Donde :

$$\rho : 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g : 9,81 \text{ m/s}^2$$

h_{menor} : El menor entre h_{der} y h_{izq}

Obtenidas las resultantes, se definen a continuación las distancias de estas respecto al punto de giro de cada bloque.

$$dF_{der} = h_{der}/3$$

$$dF_{izq} = h_{izq}/3$$

$$dF_{base1} = \frac{\Delta x_{bloque}}{2}$$

Para el caso de la fuerza F_{base2} caben dos posibilidades en función de si la $h_{der} > h_{izq}$ o viceversa.

$$\text{Si } h_{der} < h_{izq}$$

$$dF_{base2} = \frac{\Delta x_{bloque}}{3}$$

$$\text{Si } h_{der} > h_{izq}$$

$$dF_{base2} = \frac{2 \cdot \Delta x_{bloque}}{3}$$

Obtención de las fuerzas necesarias para estabilizar el bloque frente al vuelco ($P_{n-1,t}$) y deslizamiento ($P_{n-1,s}$) teniendo en cuenta la influencia del nivel freático.

Conocidas tanto la magnitud de cada una de las fuerzas en los bloques, así como las distancias de estas respecto al punto de giro, la obtención de las fuerzas necesarias para estabilizar un bloque frente a vuelco y deslizamiento se obtiene de un simple equilibrio de momentos respecto al punto de giro añadiendo las componentes generadas por el nivel freático.

En cuanto a la fuerza necesaria para estabilizar el bloque al vuelco:

$$P_{n-1,t} = \frac{P_n \cdot (M_n - \mu \Delta x) + \left(\frac{W_n}{2}\right) \cdot (Y_n \cdot \sin \alpha - \Delta x \cdot \cos \alpha) + F_{der} \cdot dF_{der} - F_{izq} \cdot dF_{izq} + F_{base1} \cdot dF_{base1} + F_{base2} \cdot dF_{base2}}{L_n}$$

En cuanto a la fuerza necesaria para estabilizar al deslizamiento:

$$P_{n-1,s} = P_n \cdot \frac{(W_n \cdot \cos \alpha - F_{base2} - F_{base1}) \cdot \mu - W_n \cdot \sin \alpha - F_{der} + F_{izq}}{1 - \mu^2}$$

Donde:

alt = Distancia entre la componente paralela a la fuerza P_n y el punto de giro del bloque.



Lbase = distancia entre la componente perpendicular a la base y el punto de giro del bloque.

δ = Ángulo del anclaje respecto a la horizontal

Δx = Espesor del bloque

Ψ = Ángulo de la línea base con la horizontal

Obtención de las resultantes R_n y S_n

La obtención de estas componentes sigue el mismo proceso que el descrito anteriormente, pero teniendo en cuenta las componentes obtenidas anteriormente para cada bloque.

$$R_n = W_n \cdot \cos \alpha - \mu \cdot (P_{n-1,t} - P_n) - F_{base2} - F_{base1}$$

$$S_n = W_n \cdot \sin \alpha - (P_{n-1,t} - P_n) - F_{izq} + F_{der}$$

4.3.2 Anexo geométrico.

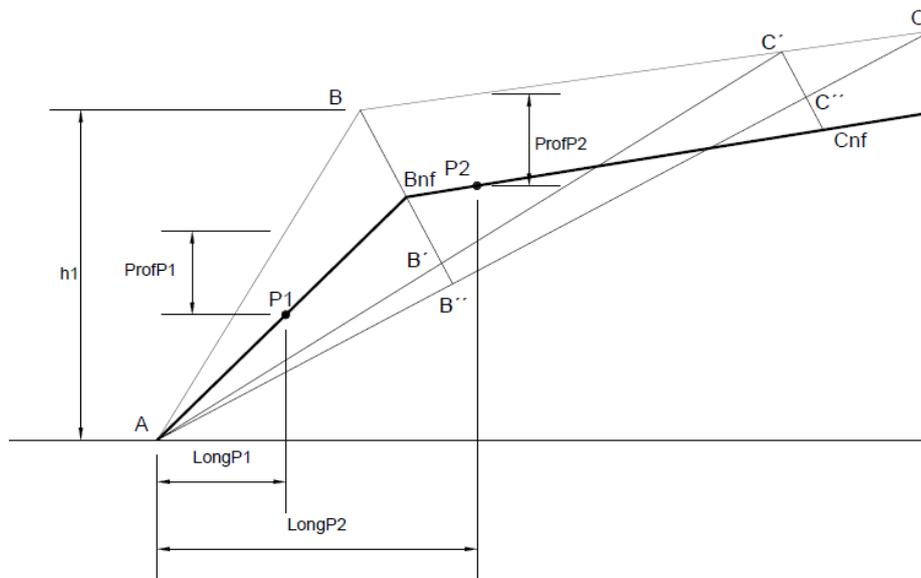


Figura N° 30- Geometría utilizada para la definición del nivel freático en el talud de 3 tramos

$$Sup_{AB} = Long_{P1} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1)$$

$$P1_Y = Sup_{AB} = -Prof_{AB}$$

$$P1_X = Long_{P1}$$

$$\alpha_{1nf} = \operatorname{Atg} \cdot \frac{P1_X}{P1_Y}$$

$$AB_{nf} = \frac{AB''}{\cos(\alpha_{1nf} - \psi)}$$

$$B_{nf}B'' = AB_{nf} \cdot \sin(\alpha_{1nf} - \psi)$$

$$B_{nf}B' = B_{nf}B'' - B'B''$$

$$Pb_{nf_x} = AB_{nf} \cdot \cos(\alpha_{1nf})$$

$$Pb_{nf_y} = AB_{nf} \cdot \sin(\alpha_{1nf})$$

$$Sup_{BC} = h1 + (Long_{P2} - AB \cdot \cos(\alpha_1)) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)$$

$$P2_Y = Sup_{BC} = -Prof_{BC}$$

$$P2_X = Long_{P2}$$



$$\alpha_{2nf} = \frac{Atg(P2_Y - Pb_{nfy})}{P2_X - Pb_{nfx}}$$

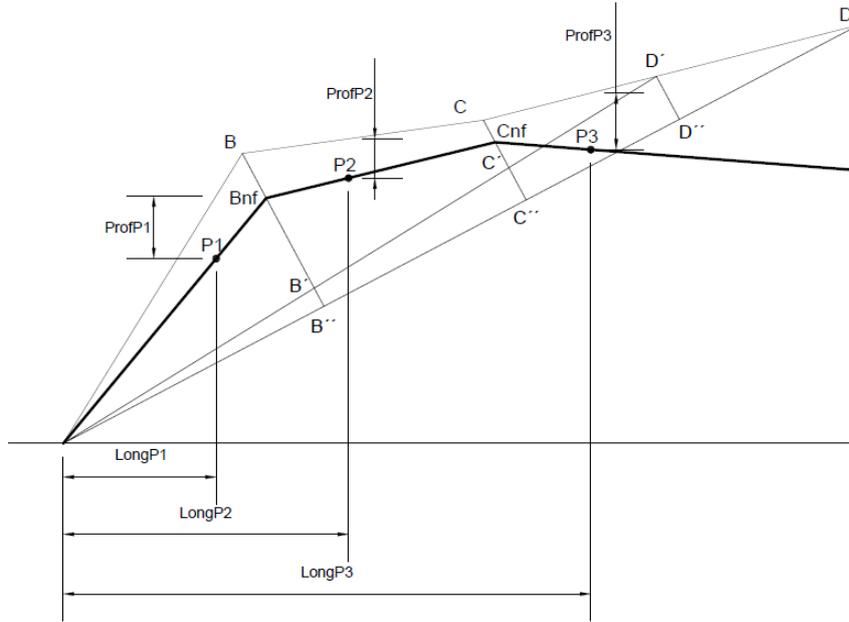


Figura N° 31- Geometría utilizada para la definición del nivel freático en el talud de 3 tramos

$$Sup_{AB} = Long_{P1} \cdot tg(\alpha_1)$$

$$P1_Y = Sup_{AB} = -Prof_{AB}$$

$$P1_X = Long_{P1}$$

$$\alpha_{1nf} = Atg \cdot \frac{P1_X}{P1_Y}$$

$$AB_{nf} = \frac{AB''}{\cos(\alpha_{1nf} - \psi)}$$

$$B_{nf}B'' = AB_{nf} \cdot \sin(\alpha_{1nf} - \psi)$$

$$B_{nf}B' = B_{nf}B'' - B'B''$$

$$Pb_{nfx} = AB_{nf} \cdot \cos(\alpha_{1nf})$$

$$Pb_{nfy} = AB_{nf} \cdot \sin(\alpha_{1nf})$$

$$Sup_{BC} = h1 + (Long_{P2} - AB \cdot \cos(\alpha_1)) \cdot tg(\alpha_2)$$

$$P2_Y = Sup_{BC} - Prof_{BC}$$

$$P2_X = Long_{P2}$$

$$\alpha_{2nf} = \frac{Atg(P2_Y - Pb_{nfy})}{P2_X - Pb_{nfx}}$$

$$B_{nf}C_{nf} = \frac{B''C''}{\cos(\psi - \alpha_{2nf})}$$

$$Pc_{nfx} = Pb_{nfx} + B_{nf}C_{nf} \cdot \cos(\alpha_{2nf})$$

$$Pc_{nfy} = Pb_{nfy} + B_{nf}C_{nf} \cdot \sin(\alpha_{2nf})$$



$$C_{nf}C'' = B_{nf}B'' - B_{nf}C_{nf} \cdot \sin(\psi - \alpha_{2nf}) \quad C_{nf}C' = C_{nf}C'' - C'C''$$

$$Sup_{CD} = h_2 + (Long_{P3} - AB \cdot \cos(\alpha_1) - BC \cdot \cos(\alpha_2)) \cdot \tan(\alpha_3)$$

$$P3_Y = Sup_{CD} - Prof_{CD} \quad P3_X = Long_{P3}$$

$$\alpha_{3nf} = \frac{\tan(P3_Y - P_{C_{nf}Y})}{P3_X - P_{C_{nf}X}}$$

4.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GOODMAN Y BRAY A CUALQUIER GEOMETRÍA DE TALUD, EXISTENCIA DE NIVEL FREÁTICO Y CORRECCIÓN MEDIANTE ANCLAJES.

4.4.1 Objetivo

El objetivo principal es el permitir al usuario el utilizar el método descrito anteriormente teniendo en cuenta la influencia tanto de la existencia de nivel freático como de anclajes en el mismo.

4.4.2 Planteamiento utilizado.

Para esta situación, la obtención de componentes geométricas del talud, alturas de bloques y puntos de aplicación de las cargas entre los mismos no varían en relación al cálculo realizado en el apartado 4.1.

Respecto al proceso de cálculo de los anclajes, la obtención de bloque de aplicación y distancias hasta el punto de giro es igual a lo ya definido para el caso de utilización del método únicamente con anclajes.

Por lo que respecta al nivel freático en cuanto a su definición geométrica, altura en cada uno de los bloques, fuerzas resultantes y distancias al punto de giro los cálculos tampoco varían de lo explicado anteriormente.

Donde realmente varía respecto a los puntos anteriores es en la obtención de las fuerzas necesarias para estabilizar el bloque frente a vuelco-deslizamiento ($P_{n-1,t}$ y $P_{n-1,s}$) y las resultantes en la base (R_n y S_n)

Su obtención es mediante una superposición de los efectos de ambos elementos, tanto de los anclajes (sin importar el número) como de las fuerzas generadas por las cargas hidrostáticas.

Por tanto:

$$P_{n-1,t} = \frac{P_n \cdot (M_n - \mu \Delta x) + \left(\frac{W_n}{2}\right) \cdot (Y_n \cdot \sin \alpha - \Delta x \cdot \cos \alpha) + F_{der} \cdot dF_{der} + M_{nf} - T \cdot \cos(\delta + \Psi) \cdot \text{alt} - T \cdot \sin(\delta + \Psi) \cdot L_{base}}{L_n}$$

Donde:



$$M_{nf} = - F_{izq} \cdot dF_{izq} + F_{base1} \cdot dF_{base1} + F_{base2} \cdot dF_{base2}$$

En cuanto a la fuerza necesaria para estabilizar al deslizamiento:

$$P_{n-1,s} = P_n - \frac{(W_n \cdot \cos \alpha - F_{base2} - F_{base1}) \cdot \mu - W_n \cdot \sin \alpha + T \cdot \cos(\delta + \Psi) + T \cdot \sin(\delta + \Psi) \cdot \mu}{1 - \mu^2}$$

Respecto al cálculo de las resultantes en la base del bloque:

$$R_n = W_n \cdot \cos \alpha - \mu \cdot (P_{n-1,t} - P_n) - F_{base2} - F_{base1} + T \cdot \sin(\delta + \Psi)$$

$$S_n = W_n \cdot \sin \alpha - (P_{n-1,t} - P_n) - F_{izq} - F_{der} - T \cdot \cos(\delta + \Psi)$$

Donde:

alt = Distancia entre la componente paralela a la fuerza P_n y el punto de giro del bloque.

Lbase = distancia entre la componente perpendicular a la base y el punto de giro del bloque.

δ = Ángulo del anclaje respecto a la horizontal

Δx = Espesor del bloque

Ψ = Ángulo de la línea base con la horizontal

4.4.3 Limitaciones.

Las limitaciones principales de este método se corresponden principalmente a la variabilidad de los casos que permite la hoja ejecutar. En concreto, el método está pensado para la geometría correspondiente a 2 y 3 tramos de talud y la posibilidad de utilizar en ellas 3 filas de anclajes con las limitaciones establecidas para los mismos y que han sido reflejadas en puntos anteriores.



5 UTILIZACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO.

5.1 BASES DE FUNCIONAMIENTO.

La hoja de cálculo está totalmente programada en Visual Basic, mediante macros que realizan las funciones así establecidas por el usuario.

La utilización de una programación en Visual Basic responde a una búsqueda de mayor simplicidad de la hoja de cálculo en la que el usuario mediante la introducción de los datos estrictamente necesarios y mediante la utilización de ciertos botones sea capaz de obtener el resultado buscado sin la necesidad de visualizar el funcionamiento de la misma.

5.2 INTRODUCCIÓN DE DATOS DEL TALUD A EVALUAR

La introducción de datos por parte del usuario se produce de manera que solo modificará el valor de las celdas correspondientes en color blanco, siendo el propio programa el que define estas celdas en base al tipo de cálculo deseado. El utilizar celdas no establecidas como “Input” por el programa puede provocar un mal funcionamiento del mismo.

5.2.1 Datos relativos a la geometría del talud.

En primer lugar, el usuario deberá definir la tipología de caso de evaluación, es decir el número de tramos del que constará el talud. Esta acción se realiza utilizando un desplegable que aparece en la parte izquierda en la hoja “Inputs”.

GEOMETRY GENERATOR INPUTS			
Slope number		2	
Slope characteristics		2	
		3	
Slope	Height (m)	4	
A-B	92,5	5	
B-C	110	6	

Figura N° 32- Selección del número de tramos a utilizar

Posteriormente a elegir el caso del que se trate, el programa pondrá en color blanco el número de celdas a rellenar.

GEOMETRY GENERATOR INPUTS			
Slope number		4	
Slope characteristics			
Slope	Height (m)	Angle (°)	Rad
A-B			
B-C			
C-D			
D-E			



Figura N° 33- Introducción de los datos geométricos del talud

Como puede apreciarse, los datos necesarios se corresponden con la altura de cada una de las aristas, así como el propio ángulo del talud.

Como complemento y comprobación de una correcta generación de la geometría, se puede visualizar el talud generado en cuestión (Previo accionamiento del Botón Solve geometry).

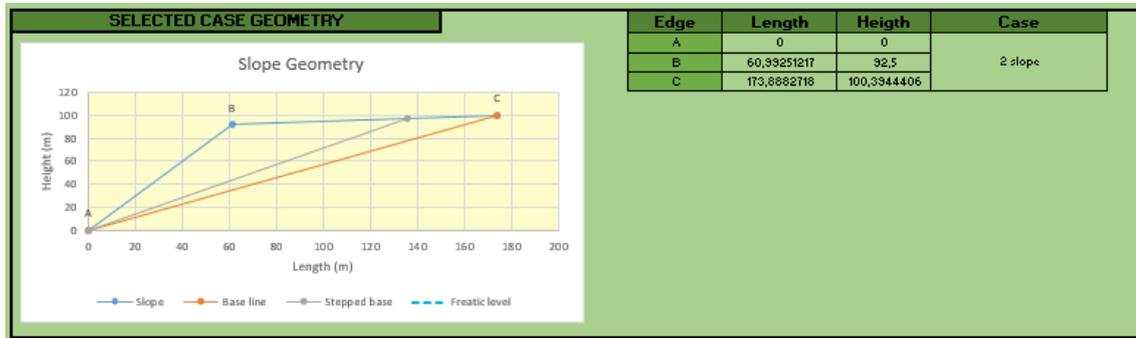


Figura N° 34- Visualización de la geometría analizada

Se puede visualizar además de una definición visual, la posición de cada una de las aristas del mismo, así como el caso en el que se está trabajando.

5.2.2 Datos relativos al estrato rocoso.

En relación a los datos a introducir por el usuario relativo a la estratificación, se sigue el mismo patrón, donde únicamente se deben rellenar las celdas en blanco.

Discontinuities		
Dip angle of discontinuities (°)	60	1,047197551
Stepped base angle (°)	35,8	0,624827872
Base line angle (°)	30	0,523598776
Base line-stepped base angle (°)	5,8	0,101229097
Column thickness (m)	10	
Unit weight (kN/m³)	25	
Friction angle μ (side/base)	0,65	0,65

Figura N° 35- Datos correspondiente a la estratificación

Las columnas en color verde, son para el caso de Steppd base angle y Base Line angle, valores obtenidos por el propio programa, mientras que los valores de la columna situada a la derecha es el paso a radianes de los mismos.

Como se aprecia los datos necesarios por el programa son:

- El ángulo de buzamiento de la estratificación



- El ángulo entre la línea base y la charnela
- El espesor considerado de los bloques
- Peso específico
- Coeficientes de rozamiento tanto de la base como entre bloques.

5.2.3 Posición de los anclajes.

Respecto a la utilización de anclajes, al igual que para la definición del número de tramos de talud, se utilizará un desplegable donde se seleccionará el número de filas de anclaje a utilizar.

Cable installation				
Select cable number	1		Case	5
Cable number	1		Rad	Force (Kn/m)
Cable 1	2			
	3			
	4			
	5			

Figura N° 36- Selección del número de anclajes

Elegido el número de anclajes se deben hacer varias distinciones:

La primera de ellas se corresponde con la utilización del módulo de anclajes sin nivel freático añadido. Este módulo permitirá la utilización de las 5 filas de anclajes, debiéndose definir en la casilla “case” el caso de estudio, es decir el número de tramos que tendrá el talud a evaluar. El máximo permitido en este módulo será de 5 tramos.

En caso de utilizar nivel freático, únicamente se podrán utilizar un máximo de 3 filas de anclajes y los casos 2 y 3 (2 y 3 tramos de talud)

Elegido el número de anclajes a utilizar y el caso de aplicación se deberán introducir los datos necesarios para el cálculo con los mismos.

Cable installation				
Select cable number	2		Case	5
Cable number	Height (m)	Angle (°)	Rad	Force (Kn/m)
Cable 1				
Cable 2				

Figura N° 37- Introducción de los datos relativos a los anclajes.

Se introducirán:

- Altura respecto a pie de talud a la que está situado el anclaje.
- Ángulo respecto a la horizontal del anclaje, siendo positivo el sentido horario.
- Fuerza por unidad de longitud horizontal



5.2.4 Definición del nivel freático.

En cuanto a la definición del nivel freático, sigue el patrón ya descrito en el punto definitorio del mismo, donde, se deberán definir 2 puntos para el caso de 2 tramos de talud y 3 puntos para el caso de 3 tramos.

Inicialmente deberá elegirse el caso que se va a evaluar mediante el desplegable que aparece en “case”.

Phreatic level	Yes	(Yes/No)	Case	2
Position (m)	x Pos (m)	Position (m)	2	
Phr. Level x position in P1		Phr. Level deep in P1	3	A-B
Phr. Level x position in P2		Phr. Level deep in P2		Between B-C

Figura N° 38- Introducción de los datos relativos al nivel freático.

Elegido el caso, el programa automáticamente determina las celdas a rellenar y los correspondientes datos a adjuntar por el usuario.

Phreatic level	Yes	(Yes/No)	Case	3
Position (m)	x Pos (m)	Position (m)	Deep (m)	
Phr. Level x position in P1		Phr. Level deep in P1		Between A-B
Phr. Level x position in P2		Phr. Level deep in P2		Between B-C
Phr. Level x position in P3		Phr. Level deep in P3		Between C-D

Figura N° 39- Introducción de los datos relativos a los anclajes.

En este caso serán necesario adjuntar distancias desde el pie de talud y profundidad de nivel freático desde el paramento del talud.

La casilla Yes/No únicamente indica la posibilidad de uso del módulo de nivel freático debiendo estar en “yes” para poder utilizar el mismo.

5.3 OPCIONES DE CÁLCULO OFRECIDAS

La hoja de cálculo tiene 4 módulos claramente diferenciados que permiten al usuario diversas opciones de cálculo. Los módulos correspondientes son:

- Cálculo con el Método de Goodman y Bray para cualquier geometría de talud (Botón Solve geometry)
- Cálculo mediante el Método de Goodman y Bray añadiendo anclajes al cálculo. (Botón Solve with cable)
- Cálculo mediante el Método de Goodman y Bray con la influencia del nivel freático (Botón Solve with phreatic level)
- Cálculo mediante el Método de Goodman y Bray con la influencia del nivel freático y la posibilidad de introducción de anclajes. (Botón S. phreatic level & cable)



Cada módulo se activa mediante un botón que ejecutará el cálculo inmediato con los datos aportados por el usuario.



Figura Nº 40- Introducción de los datos relativos a los anclajes

Es importante mencionar que para que el cálculo se realice de manera satisfactoria el usuario siempre deberá resolver el problema mediante el primero de los módulos a fin de que el programa establezca correctamente los parámetros geométricos posteriores para el resto de módulos.

5.4 REVISIÓN DE CÁLCULOS PARCIALES.

La hoja de cálculo permite al usuario la verificación de ciertos cálculos parciales en la hoja “Partial Loads”

En ella aparecen datos como los cálculos geométricos parciales realizados por el programa, número de bloques de cada tramo, espesores, variables “a” y “b” de cada bloque, bloque de aplicación de los anclajes con sus respectivas distancias al punto de giro, datos del cálculo para la generación de gráficos y los cálculos parciales de obtención de las fuerzas correspondientes al módulo de nivel freático.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2	Slope Number		Geometry of the case			Base line			Stepped base			
3		2	AB	110,798631		Posición en x	Posición en y			Posición en x	Posición en y	
4		3	AB''	99,071065		0	0			0	0	
5		4	B''C	10,0632718		173,8882718	100,3944406			135,4760308	97,708395	
6		5	BB''	49,6110938								
7		6	B''C	101,717816								
8			BC	113,17144								
9			AC	200,788881								
10			C''C	34,6089993								
11	Cable Number		AC''	166,179882								
12		1	C''C''	16,8799368								
13		2	nº de bloques	16								
14		3	b	1,05499605								
15		4	BB'	39,547822								
16		5	Espesor real	10,3862426		nbloquesAB''	9					
17		6	a11	2,60052143		espesorAB''	10,43088263					
18			a22	2,5328545		a1	5,223396926					
19	DO NOT CHANGE!!					bAB''	1,118141311					
20						nbloquesB''C''	6					
21						espesorB''C''	10,31928258					
22						a2	5,033050406					
23						BB''C''	1,136110838					
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												

Figura Nº 41- Pestaña relativa a visualización de cálculos parciales ejecutados por el programa



En relación a las celdas en rojo, se corresponden con celdas utilizadas para el funcionamiento del programa (ejecución de desplegables) por lo que no pueden ser modificadas por el usuario bajo ningún concepto para un correcto funcionamiento de la hoja de cálculo.

5.5 RESULTADOS DEL CÁLCULO

Para visualizar los resultados del cálculo, se debe accionar uno de los 4 botones correspondientes ya definidos anteriormente (previo accionamiento en primer lugar del botón Solve geometry).

Tras el proceso de cálculo, se podrán visualizar los resultados en la pestaña “Results”, donde se podrán imprimir en formato PDF, para su posterior uso.

El usuario podrá introducir los datos relativos a su proyecto, así como el autor del mismo. La fecha de ejecución del informe es automática.

Project	
Author	Date 26/09/2016 9:56

Figura N° 42- Introducción de los datos generales de proyecto

Aparecen también los datos introducidos inicialmente por el usuario para la ejecución del cálculo, tanto los datos relativos a la geometría del talud como los correspondientes a la estratificación.

Slope characteristics			Discontinuities	
Slope	Height (m)	Angle (°)	Dip angle of discontinuities (°)	60
A-B	92,5	56,6	Stepped base angle (°)	35,8
B-C	110	4	Base line angle (°)	30
			Base line-stepped base angle (°)	5,8
			Column thickness (m)	10
			Unit weight (kN/m^3)	25
			Friction coef side (μ1)	0,65
			Friction coef base (μ2)	0,65

Figura N° 43- Visualización de los datos de partida establecidos por el usuario.

Aparecen además, los datos relativos a la colocación de anclajes si se hubiese hecho el cálculo con ellos.

Cable installation				YES
Cable number	Height (m)	Angle (°)	Force (kN/m)	
Cable 1	5	35	200	

Figura N° 44- Visualización de los datos de partida correspondientes a los anclajes.

En caso de no haberse usado cable, las celdas correspondientes a los datos estarán vacías y en lugar de YES aparecerá un NO en la celda derecha a Cable installation.



También se establecen los datos relativos al uso de nivel freático en el cálculo, detallándose en caso de que se haya tenido en cuenta, la geometría dispuesta del mismo.

Phreatic Level		YES		
Position	x Pos (m)		Deep (m)	
Phr. Level x position in P1	45	Phr. Level deep in P1	10	Between A-B
Phr. Level x position in P2	75	Phr. Level deep in P2	10	Between B-C

Figura N° 45- Visualización de los datos de partida establecidos por el usuario para la definición del nivel freático.

Además, como resultado final del cálculo se indica si el talud es estable o no. En caso de no serlo se determina la fuerza mínima para retenerlo al pie.

Computation Summary	
Result	Slope is not stable
Minimum retaining Force (Kn/m)	474,7964706

Figura N° 46- Resultados finales del cálculo

En caso de que sea estable, la fuerza mínima de retención tendrá valor nulo y el resultado será “Slope is stable.”

En la segunda hoja de resultados se establecen los resultados propios del cálculo más detallado siguiendo el patrón ejecutado por [2] Goodman y Bray.

UC		GOODMAN AND BRAY TOPPLING ANALYSIS WORKSHEET										UC
Block	Yn	Yn / Δx	Mn	Ln	Pn,t	Pn,s	Pn	Rn	Sn	Sn/Rn	Mode	
1,00	5,22	0,50	5,22	0,00	1789,41	4702,52	4702,52	4236,27	5383,58	1,27	Slide	
2,00	9,33	0,89	9,33	4,11	3840,84	4967,55	4967,55	2279,01	1481,35	0,65	Slide	
3,00	13,43	1,29	13,43	8,21	5059,41	5349,21	5349,21	3281,93	2133,25	0,65	Slide	
4,00	17,54	1,68	17,54	12,32	5847,50	5505,34	5847,50	4284,85	2785,15	0,65	Slide	
5,00	21,64	2,08	21,64	16,42	6120,27	5211,06	6120,27	5065,37	3094,89	0,61	Toppling	
6,00	25,75	2,47	25,75	20,53	5942,62	4501,02	5942,62	5699,71	3179,75	0,56	Toppling	
7,00	29,85	2,86	29,85	24,63	5349,21	3396,15	5349,21	6356,58	3299,26	0,52	Toppling	
8,00	33,96	3,26	33,96	28,74	4360,97	1910,19	4360,97	7027,05	3439,70	0,49	Toppling	
9,00	38,07	3,65	38,07	32,84	2991,64	704,82	2991,64	7706,45	3593,87	0,47	Toppling	
10,00	39,55	3,81	37,01	36,95	1823,57	-23,98	1823,57	8133,82	3966,34	0,49	Toppling	
11,00	35,88	3,48	30,85	35,88	984,44	-469,53	984,44	7470,59	3788,92	0,51	Toppling	
12,00	29,71	2,88	24,68	29,71	365,50	-661,64	365,50	6235,40	3213,34	0,52	Toppling	
13,00	23,54	2,28	18,51	23,54	0,00	0,00	0,00	5021,83	2671,02	0,53	Toppling	
14,00	17,37	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3881,10	2240,75	0,58	Stable	
15,00	11,20	1,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2502,79	1444,98	0,58	Stable	
16,00	5,03	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1124,48	649,22	0,58	Stable	

Figura N° 47- Resultados del cálculo detallado

Finalmente y como ya se ha comentado, existe la posibilidad de imprimir los resultados en PDF de manera sencilla. Basta con seleccionar las opciones de imprimir como PDF en el menú archivo de Microsoft Excel.

5.6 OBTENCIÓN DE GRÁFICOS

Uno de los datos más importantes que se obtienen del análisis de resultados, es la verificación de la fuerza necesaria en cada bloque para estabilizarlo frente al vuelco o deslizamiento.

Esta fuerza, se ve en gran medida influenciada por la utilización tanto de anclajes como de la existencia de un nivel freático que afecte al cálculo.

Por ello, el usuario podrá comparar los resultados de todos estos cálculos mediante un gráfico en el que se representa la fuerza necesaria para estabilizar cada bloque.

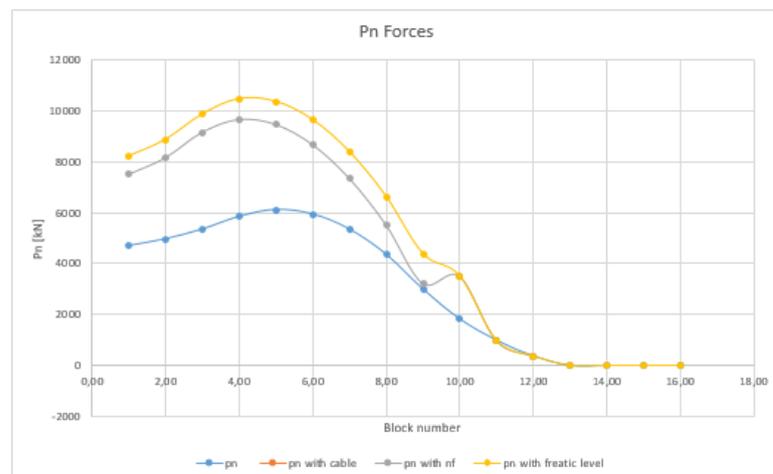


Figura N° 48- Gráfico de la fuerza necesaria para estabilizar cada bloque

Este gráfico deberá ser introducido manualmente por el usuario que lo desee en la hoja de resultados, previa utilización del botón de obtención del gráfico.

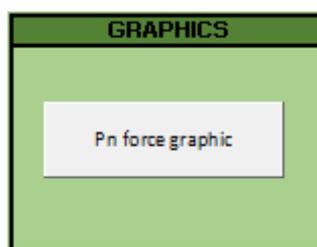


Figura N° 49- Botón de obtención de gráfico

5.7 MENSAJES DE ERROR

Existen diversos mensajes de error que el programa está automáticamente programado para dar al usuario en caso de que haya utilizado de manera inadecuada el programa. Aún así debido a la gran variabilidad en el cálculo que ofrece la hoja, es posible que puedan aparecer errores por un uso no

adecuado de la misma en los que el programa no determine la causa y sea el propio usuario el que deba discernir donde ha cometido el error.

- Desbordamiento:

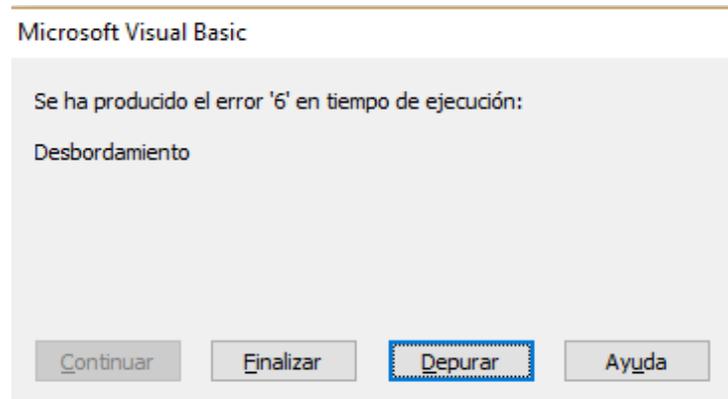


Figura N° 50- Error de desbordamiento

Este mensaje no está programado en si en el programa siendo un fallo propio de Microsoft Excel. Se incluye cuando alguna de los cálculos relativos a las macros no son posibles de realizar. Este fallo puede ocurrir por los siguientes motivos:

- Definición inadecuada de los valores del cálculo, como por ejemplo, dejar celdas vacías, valores angulares que no permiten un cálculo adecuado, etc. Se recomienda al usuario revisar que se han introducido correctamente los datos
- No se ha respetado el orden establecido para el cálculo o se ha realizado una mala elección de caso. Es decir, si en la pestaña Case de utilización de anclajes se coloca un 4 el caso elegido al establecer al geometría del talud debe ser el acorde al mismo.

La solución para poder continuar con la utilización de la hoja es pulsar en finalizar.

- Altura demasiado elevada de anclaje.

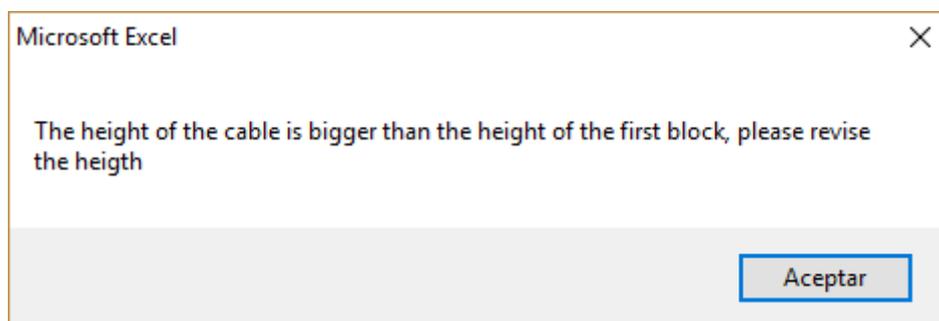


Figura N° 51- Error en la introducción de altura de anclaje



Si la colocación del anclaje se va a realizar sobre el último tramo, el usuario puede desconocer el punto exacto de altura donde intersectan el talud y la línea de charnela. Por tanto si esta altura es sobrepasada el programa automáticamente lanzará el mensaje anterior.

- Elección inadecuada de las distancias de definición del nivel freático.

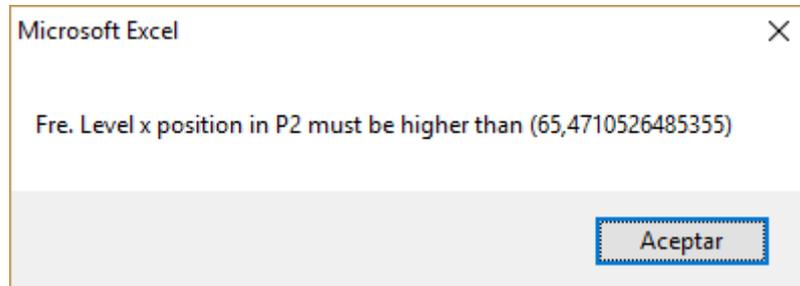


Figura N° 52- Error al definir el nivel freático

A la hora de definir los puntos para la definición del nivel freático, para una correcta definición geométrica deberán darse puntos entre las aristas correspondientes. Si el punto elegido no está dentro de un rango válido, el programa determinará el valor mínimo del mismo para que el usuario lo introduzca.

5.8 EJEMPLOS DE RESOLUCIÓN

A continuación se procede a realizar tres ejemplos que muestran la utilización de la hoja de cálculo. El primero de ellos se corresponderá con la parte de programación relativa únicamente a la resolución mediante el método de Goodman y Bray para una geometría de 6 tramos de talud. En el segundo de ellos se abordará la utilización del módulo de anclajes en una geometría de 5 tramos y finalmente en el último ejemplo se utilizará el módulo que permite el cálculo mediante uso de anclajes y nivel freático.

CASO 1

Datos de partida:

El caso 1 se corresponde con un talud de 6 tramos quebrados con las siguientes características geométricas del talud:

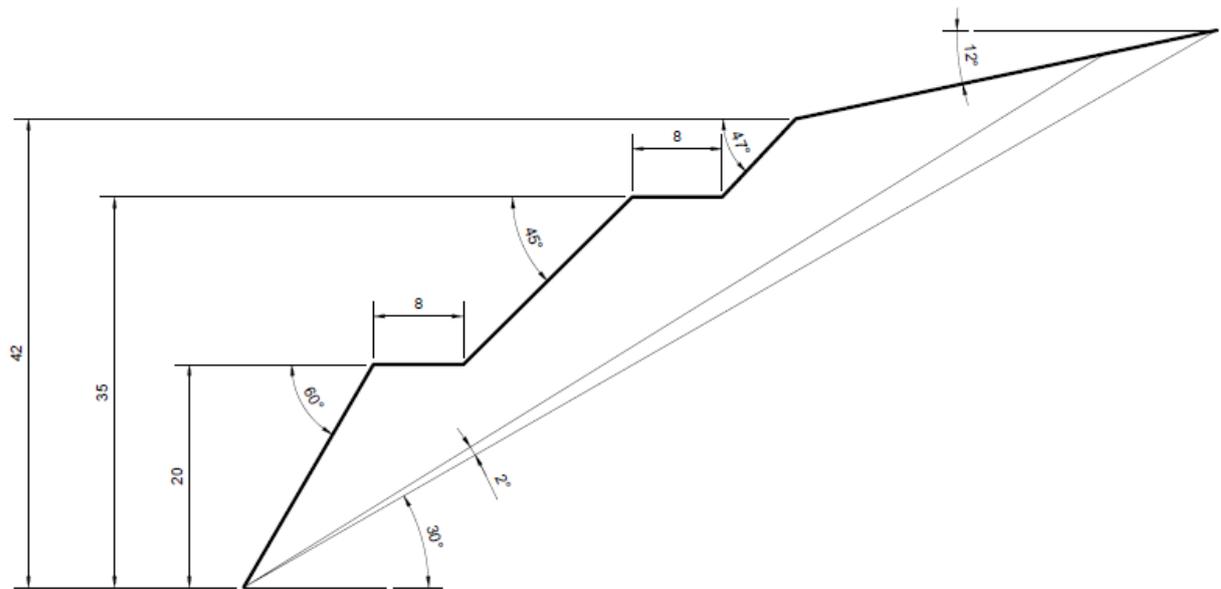


Figura N° 53- Geometría del caso 1

Los datos considerados son:

- Alturas del talud:
 - Primer tramo: 20m
 - Tercer tramo: 15m
 - Quinto tramo: 7m
- Ángulo del primer tramo: 60°
- Ángulo del segundo tramo: 0°
- Ángulo del tercer tramo: 45°
- Ángulo del cuarto tramo: 0°
- Ángulo del quinto tramo: 47°
- Ángulo del sexto tramo: 12°

Características del macizo:

- Ángulo de buzamiento: 60°
- Ángulo entre la línea base-charnela: 2°
- Espesor de los estratos: 4 metros
- Peso específico: 25 kN/m³
- Coeficientes de rozamiento:
 - Base: 0,65
 - Entre estratos: 0,65

Introducción de los datos en la hoja de cálculo y resolución:

La introducción de los datos para el cálculo dentro de la hoja de cálculo se realiza de manera muy sencilla.

En primer lugar se introducen los datos geométricos del talud seleccionado en el desplegable el caso de 6 tramos de talud.



GEOMETRY GENERATOR INPUTS			
Slope number		6	
Slope characteristics		2	
		3	
		4	
		5	
		6	
Slope	Height (m)		
A-B			
B-C			
C-D			
D-E			
E-F			
F-G			

Figura N° 54- Selección del caso geométrico 1

Elegida la opción, se deberán introducir los datos geométricos de partida en las celdas de color blanco. El tramo A-B se corresponde con el primer tramo de 20 metros de altura, B-C el segundo de 8 metros y de la misma manera los posteriores.

En los tramos horizontales B-C y D-E, el programa pedirá al usuario la longitud de este tramo horizontal mediante una ventana al darle al botón de calcular.

GEOMETRY GENERATOR INPUTS			
Slope number		6	
Slope characteristics			
Slope	Height (m)	Angle (°)	Rad
A-B	20	60	
B-C	20	0	
C-D	35	45	
D-E	35	0	
E-F	42	47	
F-G	51	12	

Figura N° 55- Introducción de los valores geométricos del caso 1

Posteriormente de igual manera se introducen los datos correspondientes al macizo rocoso.

Discontinuities		
Dip angle of discontinuities (°)	60	1,047197551
Stepped base angle (°)	32	0,558505361
Base line angle (°)	30	0,523598776
Base line-stepped base angle (°)	2	0,034906585
Column thickness (m)	4	
Unit weight (kN/m ³)	25	
Friction angle μ (side/base)	0,65	0,65

Figura N° 56- Introducción de los valores del macizo rocoso del caso 1

Introducidos los datos necesarios para el cálculo, únicamente es necesario darle al botón “Solve geometry” para que el programa realice el cálculo.

Ejecutado el cálculo se puede verificar si la geometría del talud utilizada es la deseada así como los puntos respecto a pie de talud del mismo.

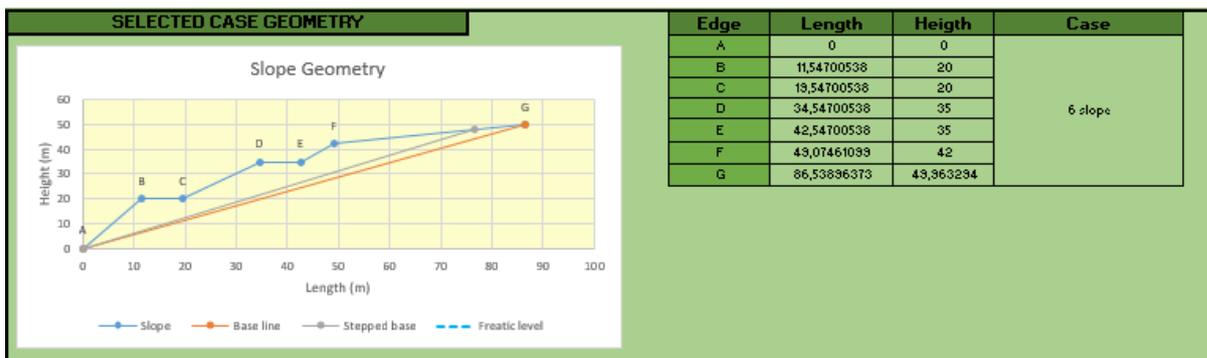


Figura N° 57- Verificación de la geometría del caso 1

Esta geometría puede ser comprobada en la pestaña “Partial loads”, verificándose también el número de bloques por tramo, espesor de los mismos y valores de “a” y “b” correspondientes.

Slope Number		Geometry of the case		Base line	
				Posición en x	Posición en y
2	AB	23,0940108			
3	AB''	20		0	0
4	B'B''	0,69841539		86,53896373	49,963294
5	BB''	11,5470054			
6	BB'	10,84859			
	BC	8			
	CD	21,2132034		a1	2,367902352
	DE	8		a2	2,367902352
	B''C''	6,92820323		a3	1,098947306
1	BB''''	4		a4	2,367902352
2	CC''	7,54700538		a5	1,253901554
3	C'C''	0,94035358		a6	1,332601982
4	CC''''	-5,49038106		a11	1,183951176
5	DD''	13,0373864		a22	1,183951176
6	C''''D	20,4903811		a33	0,549473653
	C''D''	20,4903811		a44	1,183951176
	DD''''	4		a55	0,626950777
	EE''	9,03738644		a66	0,666300991
	EE''''	-2,79837503		nbloquesAB''	4
	FF''	11,8357615		espesorAB''	4,487334102
	E''F''	9,15307228		a1	2,590763552
	F'F''	2,21746397		bAB''	0,174603847
EE'	7,30574467	F''G	36,4267282	nbloquesB''C''	1
nbloques	16	AG	99,926588	espesorB''C''	2,82687605
espesorreal	5,23798374	G''G	9,69739003	a2	1,632097648
b	0,18291442	G'G''	3,15087302	bB''C''	0,241938188
		CC'	6,60665181	nbloquesC''D''	4
		DD'	11,381493	espesorC''D''	4,097263469

Figura N° 58- Cálculos parciales del caso 1

Para visualizar los resultados se debe pulsar la pestaña “Results”. En el informe correspondiente aparecen los cálculos relativos bloque por bloque.

Block	Yn	Yn / Δx	Mn	Ln	Pn,t	Pn,s	Pn	Rn	Sn	Sn/Rn	Mode
1,00	2,59	0,58	2,59	0,00	25,82	154,44	154,44	352,09	299,76	0,85	Slide
2,00	5,01	1,12	5,01	2,42	215,63	156,64	215,63	526,22	342,04	0,65	Slide
3,00	7,42	1,65	7,42	4,83	247,36	56,36	247,36	741,81	448,11	0,60	Toppling
4,00	9,84	2,19	9,84	7,25	176,62	2,83	176,62	827,70	433,68	0,52	Toppling
5,00	10,85	2,65	8,03	9,66	124,02	71,42	124,02	629,78	330,74	0,53	Toppling
6,00	7,79	2,76	6,16	7,79	131,40	89,30	131,40	481,61	282,67	0,59	Toppling
7,00	6,61	1,61	6,61	6,61	140,17	118,11	140,17	591,76	347,13	0,59	Toppling
8,00	6,98	1,70	6,98	5,88	195,97	135,58	195,97	655,21	413,15	0,63	Toppling
9,00	7,90	1,93	7,90	6,80	223,70	119,19	223,70	718,48	432,14	0,60	Toppling
10,00	8,82	2,15	8,82	7,72	217,56	64,12	217,56	777,99	445,34	0,57	Toppling
11,00	9,73	2,38	9,73	8,64	172,74	-53,66	172,74	835,23	454,22	0,54	Toppling
12,00	11,38	2,78	8,57	9,73	73,48	-41,92	73,48	632,07	302,91	0,48	Toppling
13,00	8,32	2,94	6,69	8,32	22,17	-45,84	22,17	705,74	375,41	0,53	Toppling
14,00	7,14	1,74	7,14	7,14	33,91	19,21	33,91	788,51	462,58	0,59	Toppling
15,00	7,45	1,47	7,45	5,90	121,67	-61,93	121,67	718,30	469,53	0,65	Toppling
16,00	9,62	2,35	8,95	7,45	45,51	-93,91	45,51	807,02	418,36	0,52	Toppling
17,00	8,80	2,14	7,46	8,80	4,64	-81,83	4,64	756,77	411,38	0,54	Toppling
18,00	7,30	1,78	5,97	7,30	0,00	0,00	0,00	647,46	370,91	0,57	Toppling
19,00	5,81	1,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	517,61	298,84	0,58	Stable
20,00	4,32	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	384,74	222,13	0,58	Stable
21,00	2,83	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251,88	145,42	0,58	Stable
22,00	1,34	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	119,01	68,71	0,58	Stable

Figura N° 59- Resultado del cálculo del caso 1

En el informe se aprecia como los primeros bloques (22 a 19) son lo suficientemente cortos como para permanecer estables. Cuando esta estabilidad no es suficiente estos se encuentran en equilibrio estricto al vuelco hasta que el bloque 1 y 2 deslizan. Mencionar únicamente que el primer bloque tiene un valor superior a 0,65 al no tener una fuerza estabilizadora que lo sujete y lo coloque en equilibrio estricto no pasando esto con el bloque número 2 que apoya en el 1.

En caso de ser necesario, se puede obtener el gráfico correspondiente al valor de la fuerza necesaria para estabilizar cada bloque frente a vuelco o deslizamiento. La obtención de esta gráfica se obtiene pulsando el botón Pn Graphic en la hoja Inputs

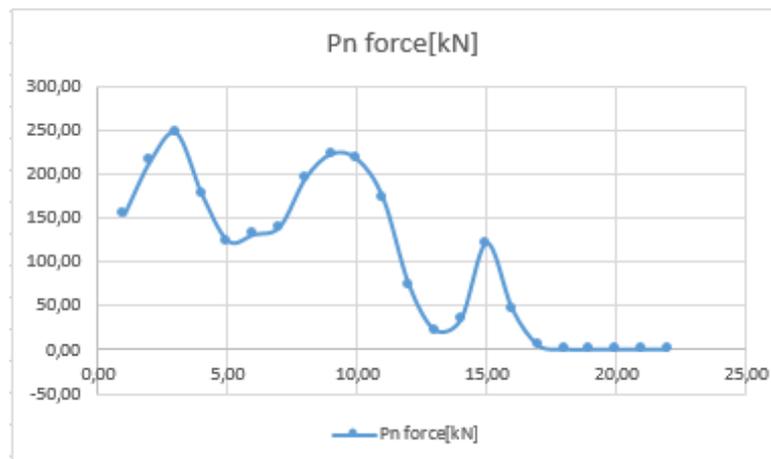


Figura N° 60- Gráfica del valor Pn por bloque del caso 1

Las fluctuaciones en la fuerza, son debidas al aumento y descenso en la altura de los bloques coincidiendo con los tramos rectos e inclinados, donde, a mayor altura de bloque se producirá un aumento en el valor Pn correspondiente a los bloques siguientes.



Finalmente, se puede imprimir el informe en formato PDF directamente desde el propio Microsoft Excel.

CASO 2:

En el presente ejemplo se realizará el cálculo hasta estabilizar el un talud similar al del caso 1 pero simplificando el último tramo, a fin de que se pueda utilizar el módulo de anclajes.

La geometría del talud es la siguiente:

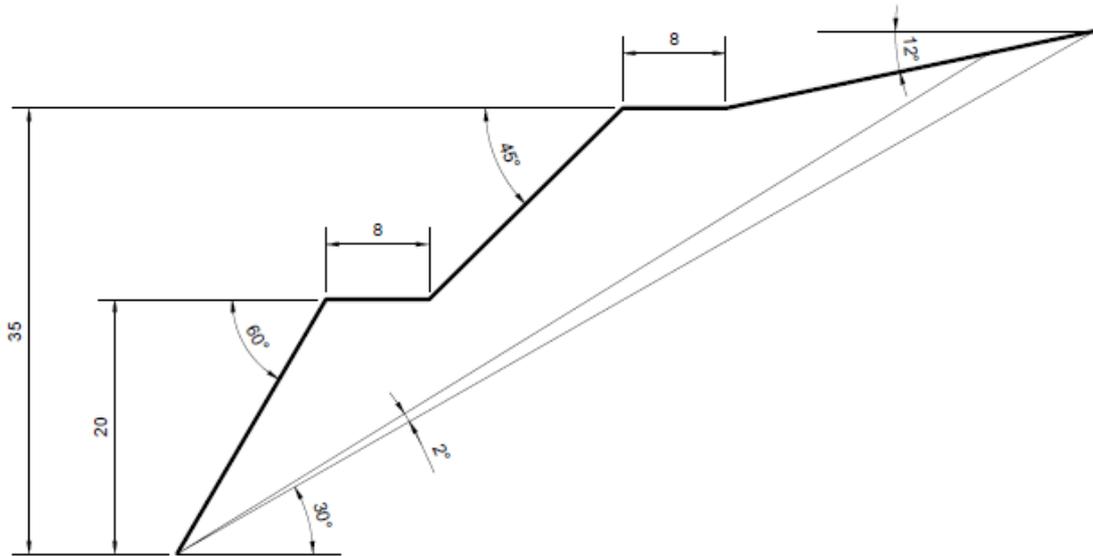


Figura N° 61- Geometría del caso 2

Los datos considerados son:

- Alturas del talud:
 - Primer tramo: 20m
 - Tercer tramo: 15m
- Ángulo del primer tramo: 60°
- Ángulo del segundo tramo: 0°
- Ángulo del tercer tramo: 45°
- Ángulo del cuarto tramo: 0°
- Ángulo del quinto tramo: 12°

Características del macizo:

- Ángulo de buzamiento: 60°
- Ángulo entre la línea base-charnela: 2°
- Espesor de los estratos: 4 metros
- Peso específico: 25 kN/m³
- Coeficientes de rozamiento:
 - Base: 0,65
 - Entre estratos: 0,65



Introducción de los datos en la hoja de cálculo y resolución:

El procedimiento de introducción de los datos geométricos del talud, así como de las características de la estratificación, es igual al mencionado para el caso 1.

En relación al módulo de anclajes, se utilizarán los siguientes anclajes.

- Fila de anclajes 1:
 - Altura desde pie de talud: 15 metros
 - Ángulo de inclinación: 35°
 - Carga: 400kN/m
- Fila de anclajes 2:
 - Altura desde pie de talud: 20 metros
 - Ángulo de inclinación: 35°
 - Carga: 400kN/m
- Fila de anclajes 3:
 - Altura desde pie de talud: 35 metros
 - Ángulo de inclinación: 35°
 - Carga: 400kN/m

La introducción de los mismos se realiza de la siguiente manera:

En primer lugar se selecciona tanto el número de filas de anclajes a usar (en este caso 3) y el caso en el que se va a realizar el cálculo, que al tratarse del caso de 5 tramos de talud le corresponde el 5 en la casilla “case”

Cable installation			
Select cable number	3	Case	5
Cable number	1	Rad	Force (Kn/m)
Cable 1	2		400
Cable 2	3		400
Cable 3	4		400
	5		

Figura Nº 62- Selección del número de anclajes del caso 2

Posteriormente se introducen los datos de cada una de las filas:

Cable installation				
Select cable number	3		Case	5
Cable number	Height (m)	Angle (°)	Rad	Force (Kn/m)
Cable 1	15	35		400
Cable 2	25	35		400
Cable 3	30	35		400

Figura Nº 63- Introducción de los datos de los anclajes del caso 2

Tras introducir todos los datos, se realizará en primer lugar el cálculo mediante el método original, es decir, sin utilizar los anclajes. Para ello deberá pulsarse el botón “Solve geometry”.

Los resultados del cálculo arrojan las siguientes conclusiones:



Block	Yn	Yn / Δx	Mn	Ln	Pn,t	Pn,s	Pn	Rn	Sn	Sn/Rn	Mode
1,00	2,59	0,58	2,59	0,00	10,87	137,03	137,03	340,49	282,18	0,83	Slide
2,00	5,00	1,12	5,00	2,41	198,15	137,99	198,15	525,61	341,65	0,65	Slide
3,00	7,42	1,65	7,42	4,83	228,61	36,97	228,61	740,15	446,35	0,60	Toppling
4,00	9,83	2,19	9,83	7,24	157,09	-32,12	157,09	830,98	435,08	0,52	Toppling
5,00	10,85	2,63	8,04	9,66	89,66	8,79	89,66	615,40	313,18	0,51	Toppling
6,00	7,80	2,78	6,18	7,80	68,39	63,93	68,39	681,88	380,40	0,56	Toppling
7,00	6,61	1,60	6,61	6,61	138,09	114,73	138,09	630,65	407,65	0,65	Toppling
8,00	6,98	1,71	6,98	5,88	192,53	130,75	192,53	653,80	411,48	0,63	Toppling
9,00	7,90	1,93	7,90	6,80	218,77	112,82	218,77	716,78	430,23	0,60	Toppling
10,00	8,82	2,15	8,82	7,72	211,07	56,16	211,07	776,01	443,22	0,57	Toppling
11,00	9,73	2,38	9,73	8,64	164,64	-66,92	164,64	838,32	455,00	0,54	Toppling
12,00	11,38	2,76	8,57	9,73	60,85	-63,65	60,85	624,14	295,51	0,47	Toppling
13,00	8,33	2,97	6,71	8,33	0,02	-80,15	0,02	703,72	368,29	0,52	Toppling
14,00	7,14	1,73	6,47	7,14	0,00	0,00	0,00	687,08	396,67	0,58	Toppling
15,00	6,30	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	605,99	349,87	0,58	Stable
16,00	4,68	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	450,32	259,99	0,58	Stable
17,00	3,06	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	294,66	170,12	0,58	Stable
18,00	1,44	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	138,99	80,25	0,58	Stable

Figura Nº 64- Resultados del cálculo sin anclajes del caso 2

Los primeros 4 bloques se comportan de manera estable siendo el 14º el primero que vuelca hasta llegar al bloque nº2 que sería el primero que desliza.

Si se desea realizar el análisis con anclajes se deberá dar al botón “Solve with cable”. Tras pulsar el botón se obtienen los siguientes resultados.

Block	Yn	Yn / Δx	Mn	Ln	Pn,t	Pn,s	Pn	Rn	Sn	Sn/Rn	Mode
1,00	2,59	0,58	2,59	0,00	-160,55	-61,12	0,00	251,42	145,16	0,58	Stable
2,00	5,00	1,12	5,00	2,41	-15,04	-90,62	0,00	485,88	280,53	0,58	Stable
3,00	7,42	1,65	7,42	4,83	-2,31	-684,97	0,00	720,35	415,89	0,58	Stable
4,00	9,83	2,19	9,83	7,24	135,91	-70,30	135,91	1329,84	475,78	0,36	Toppling
5,00	10,85	2,63	8,04	9,66	51,49	-59,60	51,49	604,35	296,19	0,49	Toppling
6,00	7,80	2,78	6,18	7,80	-13,71	-74,16	0,00	662,24	350,18	0,53	Toppling
7,00	6,61	1,60	6,61	6,61	-3,28	-77,80	0,00	585,34	337,95	0,58	Stable
8,00	6,98	1,71	6,98	5,88	-166,74	-713,00	0,00	618,42	357,04	0,58	Stable
9,00	7,90	1,93	7,90	6,80	75,79	-66,49	75,79	1219,88	477,46	0,39	Toppling
10,00	8,82	2,15	8,82	7,72	31,77	-644,59	31,77	752,40	406,90	0,54	Toppling
11,00	9,73	2,38	9,73	8,64	164,64	-66,92	164,64	1317,39	465,26	0,35	Toppling
12,00	11,38	2,76	8,57	9,73	60,85	-63,65	60,85	624,14	295,51	0,47	Toppling
13,00	8,33	2,97	6,71	8,33	0,02	-80,15	0,02	703,72	368,29	0,52	Toppling
14,00	7,14	1,73	6,47	7,14	0,00	0,00	0,00	687,08	396,67	0,58	Toppling
15,00	6,30	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	605,99	349,87	0,58	Stable
16,00	4,68	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	450,32	259,99	0,58	Stable
17,00	3,06	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	294,66	170,12	0,58	Stable
18,00	1,44	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	138,99	80,25	0,58	Stable

Figura Nº 65- Resultados del cálculo con anclajes del caso 2

Las 3 filas de anclajes (1,2y3) están aplicadas sobre los bloques 4,9 y 11. Esto se puede verificar en la pestaña “Partial loads”.



Del análisis de los cálculos realizados se puede ver como el talud es estable como así lo indica el estado del bloque de pie de talud. Además de la aplicación de la fila 3 de anclajes (situada en el bloque 9) se consigue estabilizar los bloques 7 y 8, aunque debido al propio peso de los siguientes bloques en orden descendente vuelven a estar en equilibrio estricto al vuelco hasta que se vuelven a anclar mediante la fila 1 que consigue estabilizar el talud.

Si además se aplica el botón “Pn Force Graphic” se puede visualizar la comparativa de fuerza necesaria para estabilizar los bloques tanto para el caso anclado como sin anclar.

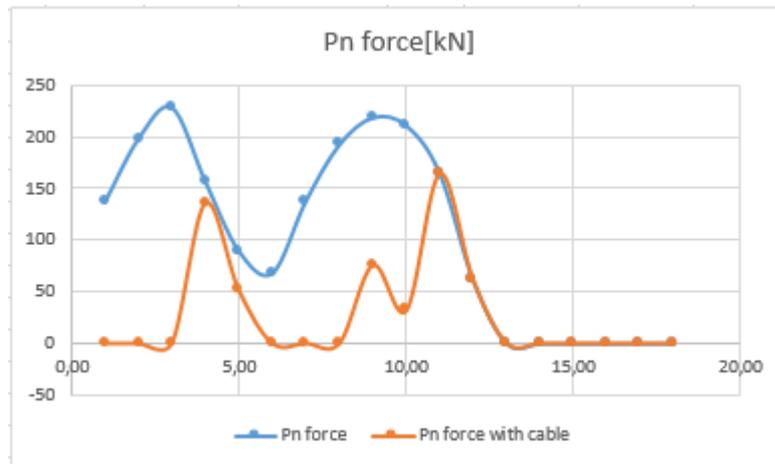


Figura N° 66- Gráfica del valor Pn del caso 2

Se puede ver claramente que los últimos 3 bloques son estables como así indica además el valor de PN nulo en contraposición del caso sin anclar.

CASO 3:

En este último caso, se realizará el cálculo de un talud de 3 tramos que tendrá la influencia del nivel freático y que será estabilizado mediante el uso de anclajes. Las características geométricas son:

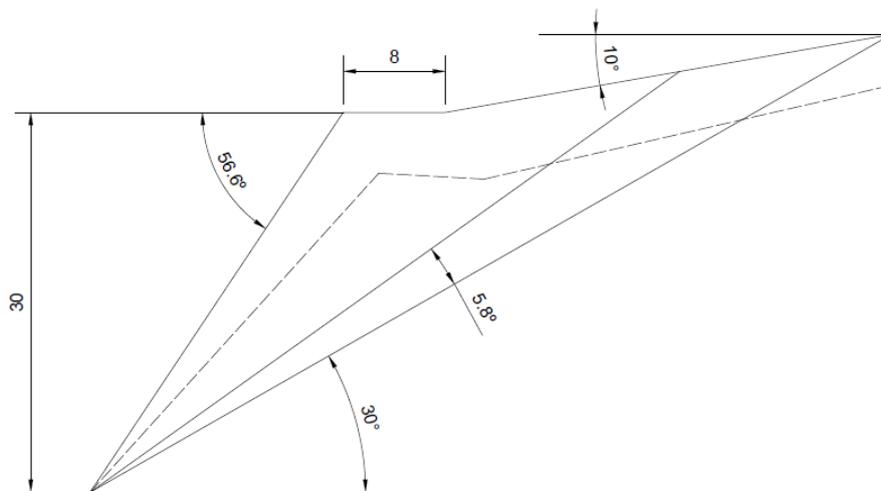


Figura N° 67- Geometría del caso 3(discontinuo nivel freático)



Los datos considerados son:

- Alturas del talud:
 - Primer tramo: 30m
- Angulo del primer tramo: 56.6°
- Ángulo del segundo tramo: 0°
- Ángulo del tercer tramo: 10°

Características del macizo:

- Ángulo de buzamiento: 60°
- Ángulo entre la línea base-charnela: 2°
- Espesor de los estratos: 4 metros
- Peso específico: 25 kN/m³
- Coeficientes de rozamiento:
 - Base: 0,65
 - Entre estratos: 0,65

Introducción de los datos en la hoja de cálculo y resolución:

Se realiza en primer lugar el cálculo sin influencia del nivel freático ni de los posibles anclajes. El resultado indica lo siguiente:

UC		GOODMAN AND BRAY TOPPLING ANALYSIS WORKSHEET										
Block	Yn	Yn / Δx	Mn	Ln	Pn,t	Pn,s	Pn	Rn	Sn	Sn/Rn	Mode	
1,00	2,15	0,50	2,15	0,00	218,54	545,64	545,64	554,73	661,15	1,19	Slide	
2,00	4,14	0,96	4,14	1,99	504,57	594,10	594,10	416,73	270,88	0,65	Slide	
3,00	6,13	1,43	6,13	3,98	665,85	622,92	665,85	617,03	401,07	0,65	Slide	
4,00	8,12	1,89	8,12	5,97	717,97	563,31	717,97	789,43	488,33	0,62	Toppling	
5,00	10,11	2,35	10,11	7,96	681,65	424,14	681,65	917,11	506,81	0,55	Toppling	
6,00	12,11	2,82	12,11	9,95	565,78	210,09	565,78	1050,56	534,15	0,51	Toppling	
7,00	14,10	3,28	14,10	11,95	375,02	64,86	375,02	1187,05	566,17	0,48	Toppling	
8,00	14,97	3,63	12,16	13,94	232,89	62,44	232,89	1243,37	629,07	0,51	Toppling	
9,00	11,92	4,25	10,30	11,92	153,53	-30,57	153,53	672,42	338,64	0,50	Toppling	
10,00	10,73	2,60	9,98	10,73	89,85	-80,39	89,85	915,81	488,96	0,53	Toppling	
11,00	9,94	2,40	8,43	9,94	31,60	-94,55	31,60	852,31	455,69	0,53	Toppling	
12,00	8,39	2,03	6,88	8,39	0,00	0,00	0,00	731,08	402,35	0,55	Toppling	
13,00	6,84	1,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	613,06	353,95	0,58	Stable	
14,00	5,30	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	474,51	273,96	0,58	Stable	
15,00	3,75	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	335,95	193,96	0,58	Stable	
16,00	2,20	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	197,40	113,97	0,58	Stable	

Figura N° 68- Resultados del cálculo sin nivel freático ni anclajes del caso 3

Los primeros 4 bloques son los que son estables. Posteriormente, el valor Sn/Rn desciende y los bloques se vuelven inestables con tendencia al vuelco. Llegados cerca del pie a medida que se hacen más cortos llega un momento en el que los mismos deslizan a partir del bloque 3 hasta el pie.

A continuación, para realizar el cálculo con nivel freático, se deben introducir las condiciones geométricas del mismo.



Para ello se deben dar 3 puntos tanto en distancia horizontal desde pie de talud como la profundidad desde el mismo.

En este caso se han considerado los siguientes puntos.

- P1:
 - Distancia desde pie de talud: 12 metros
 - Profundidad: 5 metros
- P2:
 - Distancia desde pie de talud: 25 metros
 - Profundidad: 5 metros
- P3:
 - Distancia desde pie de talud: 40 metros
 - Profundidad: 5 metros

Para introducirlos se deberán colocar en el apartado correspondiente a nivel freático, debiendo definir además el valor 3 (correspondiente a 3 tramos) en la casilla “case”.

Phreatic level	Yes	(Yes/No)	Case	3
Position (m)	x Pos (m)	Position (m)	Deep (m)	
Phr. Level x position in P1	12	Phr. Level deep in P1	5	Between A-B
Phr. Level x position in P2	25	Phr. Level deep in P2	5	Between B-C
Phr. Level x position in P3	40	Phr. Level deep in P3	5	Between C-D

Figura N° 69- Introducción de datos del nivel freático del caso 3

Introducidos los datos, se le puede dar al botón “Solve with phreatic level”, dando los siguientes resultados

UC		GOODMAN AND BRAY TOPPLING ANALYSIS WORKSHEET										UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
Block	Yn	Yn / Δx	Mn	Ln	Pn,t	Pn,s	Pn	Rn	Sn	Sn/Rn	Mode	
1,00	2,15	0,50	2,15	0,00	1139,10	1876,31	1876,31	1390,74	2001,07	1,44	Slide	
2,00	4,14	0,96	4,14	1,99	1416,13	1790,40	1790,40	249,36	162,08	0,65	Slide	
3,00	6,13	1,43	6,13	3,98	1392,68	1641,99	1641,99	342,79	222,81	0,65	Slide	
4,00	8,12	1,89	8,12	5,97	1247,24	1431,07	1431,07	436,22	283,54	0,65	Slide	
5,00	10,11	2,35	10,11	7,96	1015,49	1157,65	1157,65	529,65	344,27	0,65	Slide	
6,00	12,11	2,82	12,11	9,95	709,34	821,72	821,72	623,08	405,00	0,65	Slide	
7,00	14,10	3,28	14,10	11,95	423,28	388,70	423,28	716,51	465,73	0,65	Slide	
8,00	14,97	3,63	12,16	13,94	249,05	130,60	249,05	889,03	557,90	0,63	Toppling	
9,00	11,92	4,25	10,30	11,92	189,68	79,28	189,68	493,08	252,10	0,51	Toppling	
10,00	10,73	2,60	9,98	10,73	120,17	23,23	120,17	697,28	389,48	0,56	Toppling	
11,00	9,94	2,40	8,43	9,94	48,64	-39,56	48,64	692,95	394,44	0,57	Toppling	
12,00	8,39	2,03	6,88	8,39	0,08	-53,86	0,08	624,44	354,95	0,57	Toppling	
13,00	6,84	1,65	5,34	6,84	-46,83	-53,62	0,00	572,50	340,98	0,60	Stable	
14,00	5,30	1,28	3,79	5,30	-88,40	-42,26	0,00	468,44	273,52	0,58	Stable	
15,00	3,75	0,91	2,24	3,75	-128,39	-24,83	0,00	335,95	193,96	0,58	Stable	
16,00	2,20	0,53	0,70	2,20	0,00	0,00	0,00	197,40	113,97	0,58	Stable	

Figura N° 70- Resultados del cálculo con nivel freático del caso 3



Como se aprecia en los primeros bloques se mantiene la estabilidad, siendo influyente el nivel freático desde el bloque 14 hasta el pie de talud. El nivel freático produce una reducción de la componente R_n en los bloques. Esto provoca en los bloques 13 y 14 a pesar de seguir siendo estables un aumento del valor S_n/R_n , debido al concepto de tensiones efectivas.

Ejecutado el análisis con influencia únicamente del nivel freático, se realiza la introducción de las 3 filas de anclajes hasta conseguir estabilizar el talud.

- Fila de anclajes 1:
 - Altura desde pie de talud: 3 metros
 - Ángulo de inclinación: 35°
 - Carga: 285kN/m
- Fila de anclajes 2:
 - Altura desde pie de talud: 7 metros
 - Ángulo de inclinación: 35°
 - Carga: 400kN/m
- Fila de anclajes 3:
 - Altura desde pie de talud: 12 metros
 - Ángulo de inclinación: 35°
 - Carga: 400kN/m

Introducidos los datos de los anclajes, se procede a calcular mediante el botón “S. phreatic level & cable”. Los resultados que se obtienen son los siguientes:

UC		GOODMAN AND BRAY TOPPLING ANALYSIS WORKSHEET										Escudo de la Universidad de Cantabria
Block	Y_n	$Y_n / \Delta x$	M_n	L_n	$P_{n,t}$	$P_{n,s}$	P_n	R_n	S_n	S_n/R_n	Mode	
1,00	2,15	0,50	2,15	0,00	-97,87	474,80	474,80	738,06	479,11	0,65	Slide	
2,00	4,14	0,96	4,14	1,99	770,55	1089,65	1089,65	1067,38	693,79	0,65	Slide	
3,00	6,13	1,43	6,13	3,98	1392,68	1641,99	1641,99	1160,81	754,52	0,65	Slide	
4,00	8,12	1,89	8,12	5,97	1247,24	1431,07	1431,07	436,22	283,54	0,65	Slide	
5,00	10,11	2,35	10,11	7,96	1015,49	1157,65	1157,65	529,65	344,27	0,65	Slide	
6,00	12,11	2,82	12,11	9,95	709,34	821,72	821,72	623,08	405,00	0,65	Slide	
7,00	14,10	3,28	14,10	11,95	423,28	388,70	423,28	716,51	465,73	0,65	Slide	
8,00	14,97	3,63	12,16	13,94	249,05	130,60	249,05	889,03	557,90	0,63	Toppling	
9,00	11,92	4,25	10,30	11,92	189,68	79,28	189,68	493,08	252,10	0,51	Toppling	
10,00	10,73	2,60	9,98	10,73	120,17	23,23	120,17	697,28	389,48	0,56	Toppling	
11,00	9,94	2,40	8,43	9,94	48,64	-39,56	48,64	692,95	394,44	0,57	Toppling	
12,00	8,39	2,03	6,88	8,39	0,08	-53,86	0,08	624,44	354,95	0,57	Toppling	
13,00	6,84	1,65	5,34	6,84	-46,83	-53,62	0,00	572,50	340,98	0,60	Stable	
14,00	5,30	1,28	3,79	5,30	-88,40	-42,26	0,00	468,44	273,52	0,58	Stable	
15,00	3,75	0,91	2,24	3,75	-128,39	-24,83	0,00	335,95	193,96	0,58	Stable	
16,00	2,20	0,53	0,70	2,20	0,00	0,00	0,00	197,40	113,97	0,58	Stable	

Figura N° 71- Resultados del cálculo con nivel freático y anclajes del caso 3

Los anclajes están aplicados sobre los bloques 1, 2 y 3. De esa aplicación, se consigue la disminución del valor de la fuerza necesaria para estabilizar el bloque de pie frente al deslizamiento que traían los anteriores estando en equilibrio estricto frente al mismo. La utilización si no existiese nivel freático de estos anclajes provocaría que directamente el bloque 2 fuese estable solo necesitándose el anclaje de la

fila 3 para estabilizar el propio talud, ya que los bloques 1 y 2 son estables por si mismos si no están afectados por el efecto del agua.

Block	Yn	Yn / Δx	Mn	Ln	Pn,t	Pn,s	Pn	Rn	Sn	Sn/Rn	Mode
1,00	2,15	0,50	2,15	0,00	-184,25	-48,46	0,00	200,07	115,51	0,58	Stable
2,00	4,14	0,96	4,14	1,99	-141,00	-106,66	0,00	385,23	222,41	0,58	Stable
3,00	6,13	1,43	6,13	3,98	665,85	622,92	665,85	1435,05	932,78	0,65	Slide
4,00	8,12	1,89	8,12	5,97	717,97	563,31	717,97	789,43	488,33	0,62	Toppling
5,00	10,11	2,35	10,11	7,96	681,65	424,14	681,65	917,11	506,81	0,55	Toppling
6,00	12,11	2,82	12,11	9,95	565,78	210,09	565,78	1050,56	534,15	0,51	Toppling
7,00	14,10	3,28	14,10	11,95	375,02	64,86	375,02	1187,05	566,17	0,48	Toppling
8,00	14,97	3,63	12,16	13,94	232,89	62,44	232,89	1243,37	629,07	0,51	Toppling
9,00	11,92	4,25	10,30	11,92	153,53	-30,57	153,53	672,42	338,64	0,50	Toppling
10,00	10,73	2,60	9,98	10,73	89,85	-80,39	89,85	915,81	488,96	0,53	Toppling
11,00	9,94	2,40	8,43	9,94	31,60	-94,55	31,60	852,31	455,69	0,53	Toppling
12,00	8,39	2,03	6,88	8,39	0,00	0,00	0,00	731,08	402,35	0,55	Toppling
13,00	6,84	1,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	613,06	353,95	0,58	Stable
14,00	5,30	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	474,51	273,96	0,58	Stable
15,00	3,75	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	335,95	193,96	0,58	Stable
16,00	2,20	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	197,40	113,97	0,58	Stable

Figura N° 72- Resultados del cálculo sin nivel freático y con anclajes del caso 3

En la imagen anterior se ha realizado el cálculo del talud con una única fila de anclajes (la fila 3) y se aprecia como al aplicarlo sobre el bloque 3 los bloques 1 y 2 son estables por si mismos en contraposición a lo que ocurre cuando le afecta el nivel freático.

Esto quiere decir que el bloque 1 necesita estar sujeto mediante la fila 1 de anclajes y será esta la que consiga la estabilidad de todo el talud.

Por otro lado, se puede ver la gráfica de la fuerza Pn que compara los casos generales, con nivel freático y nivel freático corregido mediante anclajes donde se aprecia la disminución de fuerza Pn necesaria al aplicar los anclajes.

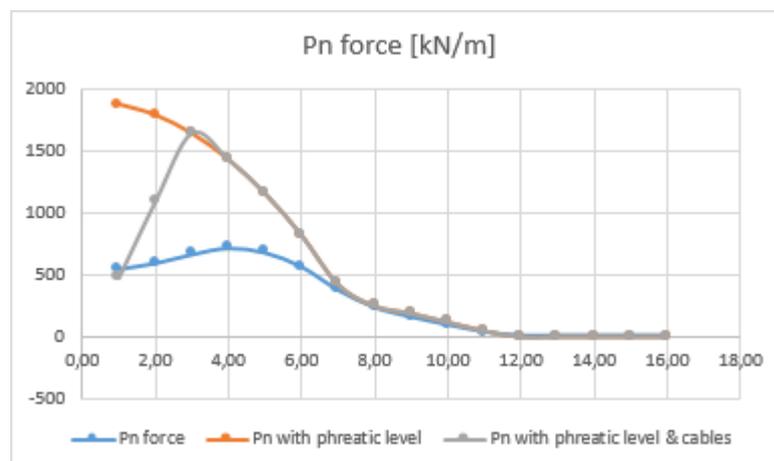


Figura N° 73- Gráfica comparativa del valor Pn con nivel freático y anclajes del caso 3



6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado un análisis lo más detallado posible al fenómeno de inestabilidad de taludes conocido como “toppling”, y mediante la interpretación de los diversos estudios realizados por parte de ciertos investigadores se ha realizado una hoja de cálculo cuyo propósito principal es el facilitar la tarea del usuario que desee evaluar un talud frente a este fenómeno.

La introducción en este proceso de análisis de diferentes posibilidades geométricas, posibilidad de utilización de anclajes en el cálculo así como la influencia del nivel freático, permite una amplia evaluación del fenómeno necesitándose para ello una cantidad de datos no muy extensa. Con esta hoja, se resuelve por tanto la escasez tanto de programas de cálculo que analicen de manera detallada este fenómeno.

Desde el punto de vista del manejo, la hoja de cálculo tiene funciones claramente determinadas siendo relativamente sencilla su utilización así como la interpretación de los resultados. Por otro lado, se abre en este punto la posibilidad de ampliación de la misma, con la posibilidad de introducir el efecto sísmico en el cálculo o la posibilidad de realizar el mismo cálculo por elementos de espesor infinitesimal ([³] Sagaseta) cuya utilidad se ha visto en puntos anteriores del trabajo.