Cálculo del círculo de deslizamiento pésimo

Estabilidad global del terreno

Estabilidad global del terreno

Cálculo del círculo de deslizamiento pésimo

Software *para*
Arquitectura,
Ingeniería *y*
Construcción

CYPE Ingenieros, S.A.
Avda. Eusebio Sempere, 5
03003 **Alicante**
Tel. (+34) 965 92 25 50
Fax (+34) 965 12 49 50
cype@cype.com

CYPE Madrid
Augusto Figueroa, 32-34, bajo
28004 Madrid
Tel. (+34) 915 22 93 10
Fax (+34) 915 31 97 21
cype.madrid@cype.com

CYPE Catalunya
Almogàvers, 64-66, 2º A
08018 Barcelona
Tel. (+34) 934 85 11 02
Fax (+34) 934 85 56 08
cype.catalunya@cype.com

www.cype.com

IMPORTANTE: ESTE TEXTO REQUIERE SU ATENCIÓN Y SU LECTURA

La información contenida en este documento es propiedad de CYPE Ingenieros, S.A. y no puede ser reproducida ni transferida total o parcialmente en forma alguna y por ningún medio, ya sea electrónico o mecánico, bajo ningún concepto, sin la previa autorización escrita de CYPE Ingenieros, S.A. La infracción de los derechos de propiedad intelectual puede ser constitutiva de delito (arts. 270 y sgts. del Código Penal).

Este documento y la información en él contenida son parte integrante de la documentación que acompaña a la Licencia de Uso de los programas informáticos de CYPE Ingenieros, S.A. y de la que son inseparables. Por consiguiente está amparada por sus mismas condiciones y deberes.

No olvide que deberá leer, comprender y aceptar el Contrato de Licencia de Uso del software del que es parte esta documentación antes de utilizar cualquier componente del producto. Si NO acepta los términos del Contrato de Licencia de Uso devuelva inmediatamente el software y todos los elementos que le acompañan al lugar donde lo adquirió para obtener un reembolso total.

Este manual corresponde a la versión del software denominada por CYPE Ingenieros, S.A. como Elementos de Contención (Muros en Ménsula de H.A. y Muros Pantalla). La información contenida en este documento describe sustancialmente las características y métodos de manejo del programa o programas a los que acompaña. La información contenida en este documento puede haber sido modificada posteriormente a la edición mecánica de este libro sin previo aviso. El software al que acompaña este documento puede ser sometido a modificaciones sin previo aviso.

CYPE Ingenieros, S.A. dispone de otros servicios entre los que se encuentra el de Actualizaciones, que le permitirá adquirir las últimas versiones del software y la documentación que le acompaña. Si Ud. tiene dudas respecto a este escrito o al Contrato de Licencia de Uso del software o quiere ponerse en contacto con CYPE Ingenieros, S.A., puede dirigirse a su Distribuidor Local Autorizado o al Departamento Posventa de CYPE Ingenieros, S.A. en la dirección:

Avda. Eusebio Sempere, 5 · 03003 Alicante (España) · Tel: +34 965 92 25 50 · Fax: +34 965 12 49 50 · www.cype.com

© CYPE Ingenieros, S.A.

1ª Edición

Editado e impreso en Alicante (España)

Windows ® es marca registrada de Microsoft Corporation ®

Índice general

1. Introducción 5

1.1. Fenómeno de la estabilidad global 5

1.2. Cálculo del coeficiente de seguridad frente al deslizamiento circular 6

1.3. Métodos de cálculo 6

1.4. Método de las fajas o rebanadas (Método simplificado de Bishop) 7

2. Consideraciones y métodos de cálculo 9

2.1. Hipótesis de cálculo 9

2.2. Adecuación del método de las fajas o rebanadas. (Método simplificado de Bishop) 10

2.3. Proceso de cálculo 11

3. Bibliografía de referencia 13

4. Ejemplo nº 1. Muros en Ménsula de H.A. 15

4.1. Círculo de deslizamiento pésimo de un muro de contención en ménsula 15

4.1.1. Datos del problema 15

4.1.2. Resultados del programa 16

4.1.3.Cálculos para comparar con los resultados del programa 17

5. Ejemplo nº 2. Muros Pantalla 19

5.1. Círculo de deslizamiento pésimo en una fase cualquiera de un muro pantalla 19

5.1.1. Datos del problema 19

5.1.2. Resultados del programa 20

5.1.3. Cálculos para comparar con los resultados del programa 21

1. Introducción

1.1. Fenómeno de la estabilidad global

Como consecuencia del desnivel que generan los elementos de contención, el terreno presenta una tendencia a nivelarse, por lo que se induce a la masa del terreno a un posible problema de inestabilidad global al que se opondrá la resistencia al corte del terreno.

Este tipo de inestabilidad puede clasificarse en dos grandes grupos: **desprendimientos** (la masa inestable cae) y **corrimientos** (la masa inestable se desplaza). De estos últimos, un caso típico es el de deslizamiento, en el que una masa del suelo se desliza con respecto a otra cuando la resistencia al corte es superada a lo largo de la zona que las separa. Este deslizamiento podrá seguir superficies de forma plana, curva, quebrada o una combinación de ellas.

Por lo tanto, en toda estructura de contención deberá comprobarse la seguridad frente a fenómenos de estabilidad global.

En la práctica, generalmente se estudian superficies de deslizamiento circulares, por lo que será necesario determinar aquel círculo que demande la mayor resistencia del terreno o, lo que es lo mismo, que posea un coeficiente de seguridad mínimo frente al deslizamiento circular, siendo este coeficiente la relación entre la resistencia al corte del terreno en rotura y la resistencia al corte que debe desarrollar el mismo.

Las fuerzas que tienden a desestabilizar una determinada masa de suelo son, principalmente, su propio peso, el del elemento de contención, las sobrecargas contenidas dentro del círculo, la excitación sísmica y cualquier otra acción externa desestabilizadora.

Para llevar a cabo la determinación del círculo de deslizamiento pésimo deberán conocerse los datos del problema, esto es, el desnivel (talud), las características del elemento de contención, la estratigrafía, el conjunto de cargas sobre el sistema elemento de contención – terreno y por último la elección de un método cuya formulación se adecue al problema en cuestión.

Las siguientes figuras esquematizan el problema de la estabilidad global que aquí se trata.

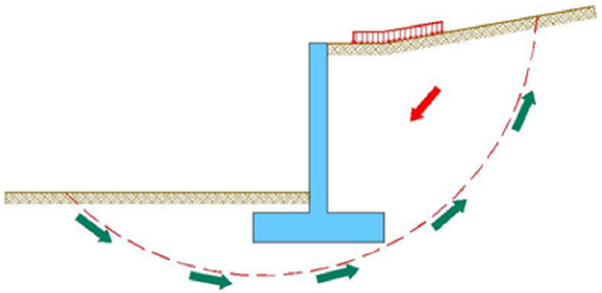

Fig. 1.1

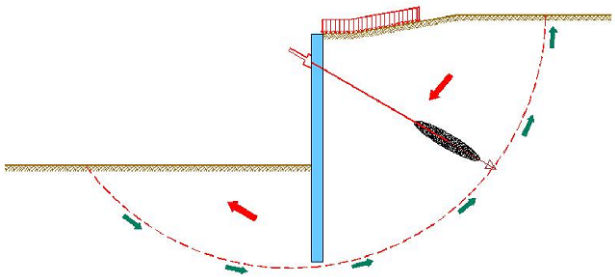

Fig. 1.2

1.2. Cálculo del coeficiente de seguridad frente al deslizamiento circular

Como se ha comentado anteriormente, el coeficiente de seguridad que una masa de suelo potencialmente inestable tiene frente a un fenómeno de deslizamiento circular, puede evaluarse como la relación entre el efecto de las acciones estabilizadoras frente al efecto de las acciones desestabilizadoras.

Cuantitativamente, puede expresarse, en términos de momentos como:

$$F = \frac{\sum ME}{\sum MD}$$

Donde:

$\sum ME$: sumatoria de los momentos producidos por las acciones **estabilizadoras** respecto al centro del círculo en estudio.

$\sum MD$: sumatoria de los momentos producidos por las acciones **desestabilizadoras** respecto al centro del círculo en estudio.

Este coeficiente de seguridad podrá asociarse a distintos parámetros, como son la resistencia del terreno, el valor de las sobrecargas, a la excitación sísmica, etc., según sean los valores que se emplean de dichos parámetros en la formulación. Es decir, que el coeficiente de seguridad obtenido valorará la resistencia al corte exigida al terreno, o el exceso de sobrecarga que puede actuar sobre el terreno, o la máxima excitación sísmica aceptada por el sistema, etc.

1.3. Métodos de cálculo

Actualmente, existen diversos métodos para el cálculo del coeficiente de seguridad de una masa potencialmente inestable frente a fenómenos de deslizamiento circular. En general, estos métodos consisten en proponer una superficie de deslizamiento y estudiar su equilibrio, en función del sistema de acciones que se desarrollan. Este estudio parte de subdividir la masa del terreno deslizante en pequeñas porciones de formas geométricas, tales que, permitan un cálculo sencillo de las acciones a las que éstas se ven sometidas.

Una vez identificadas las acciones sobre la masa del terreno y basándose en una serie de hipótesis, se establecen las ecuaciones de equilibrio correspondiente, de las que, con un previo cálculo más o menos complejo según el método utilizado, se obtendrá el valor de coeficiente de seguridad del círculo en estudio.

Este procedimiento se repite sucesivamente para un número suficientemente significativo de círculos posibles de deslizamiento variando tanto el radio como su posición en el espacio. Cada uno de ellos arrojará un coeficiente de seguridad, siendo el mínimo de ellos, el coeficiente de seguridad del sistema.

Para el trazado de todos esos círculos, usualmente se emplea una malla ortogonal X-Y como base, en la que en cada punto de ella, se trazan todos y cada uno de los círculos posibles de deslizamiento con radios crecientes. En la figura 1.3 se muestra un círculo genérico de radio "R" cuyo centro es el punto "o" de dicha malla ortogonal.

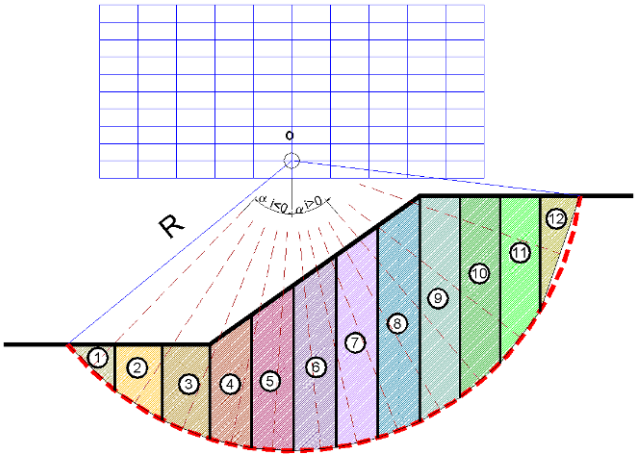

Fig. 1.3

1.4. Método de las fajas o rebanadas (Método simplificado de Bishop)

Este método consiste en analizar el equilibrio de una masa del terreno que sigue una superficie de deslizamiento circular, para ello se traza un círculo sobre la sección transversal del terreno y se subdivide la masa deslizante contenida en dicho círculo, en fajas o rebanadas.

Basándose en el esquema de cuerpo libre de cada faja genérica "i", como el que se muestra en la figura 1.4, se plantea la formulación matemática del método.

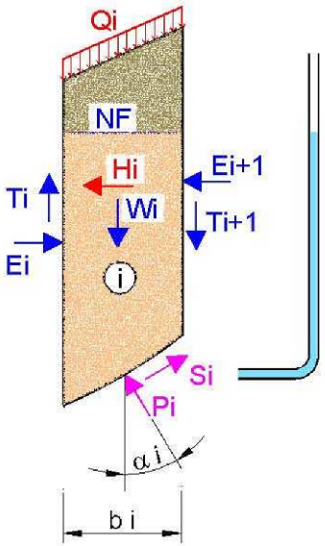

Fig. 1.4

Para un determinado talud, la ecuación utilizada para la obtener el coeficiente de seguridad "F" de un círculo cualquiera de radio R (que podrá o no tener sobrecargas "Q") es la siguiente[1]:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}\left[\frac{c_i \times b_i + (W_i + Q_i - u_i \times b_i) \times tg\phi_i}{m\alpha_i}\right]}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \times sen\alpha_i} \qquad (1)$$

donde,

$$m\alpha_i = \cos\alpha_i \times \left(1 + \frac{tg\phi_i \times tg\alpha_i}{F}\right) \qquad (2)$$

b_i : ancho de la faja "i".

c_i : valor de la cohesión del terreno en el punto medio de la base de la faja "i".

tg ϕ_i : valor de la tangente del ángulo de rozamiento interno del terreno en el punto medio de la base de la faja "i".

α_i : valor del ángulo que forma la recta que une el centro del círculo con el punto medio de la base de la faja "i" respecto a la vertical.

W_i: suma del peso de todos los estratos de terreno que gravitan sobre el punto medio de la base de la faja "i".

Q_i: resultante de la presión que producen las sobrecargas actuante en el terreno sobre el punto medio de la base de la faja "i".

u_i : valor de la sobrepresión de poros en el punto medio de la base de la faja "i".

Se supone que las fuerzas entre fajas son de valor nulo, esto es, $\{\Delta T_i\} = 0$ y $\{\Delta E_i\} = 0$.

La ecuación anterior, es del tipo implícita en F, por lo que se resuelve mediante iteraciones sucesivas, partiendo de un valor inicial de F = F1 que se introduce en la ecuación (2) y se compara con el valor F2 que se obtiene de la ecuación (1). Si los valores de F1 y F2 no son lo suficientemente aproximados entre sí, se procede a una nueva iteración partiendo del valor de F2 en la ecuación (2) y así sucesivamente, hasta la convergencia a un valor final del coeficiente de seguridad F.

[1] Para la obtención de la formulación y sus hipótesis, se recomienda consultar las referencias bibliográficas I y IV indicadas a continuación.

2. Consideraciones y métodos de cálculo

2.1. Hipótesis de cálculo

Como en todo análisis, es necesario definir primeramente las hipótesis o suposiciones en las que se fundamenta el mismo. Por ello, y para tener en cuenta situaciones particulares como la presencia de un elemento de contención, nivel freático, cargas en coronación, etc., se resumen a continuación cuáles han sido las hipótesis que se han contemplado a la hora de calcular el círculo de deslizamiento pésimo.

- El método empleado para el cálculo del coeficiente de seguridad pésimo es el **Método de las fajas o rebanadas** o también llamado **Método simplificado de Bishop**, en el cual se supone que las fuerzas entre fajas son de valor nulo, esto es, $\{\Delta T_i\} = 0$ y $\{\Delta E_i\} = 0$. Para ver las limitaciones y validez del método, se recomienda consultar la bibliografía de referencia.
- El suelo es homogéneo y no existe el predominio de bloques en la composición del mismo.
- Se considera que la resistencia al corte del terreno es la que indica la ecuación de Mohr-Coulomb, es decir, $\tau = c + (\sigma - \mu)\ tg\ \phi$.
- Se considera un estado de deformación plana por lo que se estudia una unidad de ancho del sistema.
- La masa inestable sigue una potencial superficie de deslizamiento de directriz circular.
- No se consideran fenómenos de desprendimientos o desplomes, ni de licuefacción, ni la existencia de irregularidades como diaclasas, erosión por fluidos, socavación por corrientes naturales, etc.
- Los estratos se consideran perfectamente horizontales en toda su extensión, y el estrato más profundo se asume de extensión semi-infinita en profundidad.
- La densidad del terreno de un estrato será aparente o sumergida según se encuentre dicho estrato por encima o por debajo del nivel freático.
- Se analizan los círculos profundos que penetren en el terreno, no así aquellos que penetren en un estrato rocoso.
- No se consideran círculos que en parte queden al exterior, sin cortar terreno alguno.
- No se consideran tensiones de capilaridad en la masa de suelo.
- El nivel freático se considera en equilibrio horizontal.
- En el caso de muros pantallas, no se considera las acciones que los anclajes y puntales producen sobre la pantalla, es decir, que se analiza el equilibrio sin la contribución de dichos elementos. Si el coeficiente obtenido bajo esta hipótesis extrema es satisfactorio, significará que la contribución de los elementos de apoyo no sería, en rigor, necesaria. En el caso de que el coeficiente obtenido no resultase satisfactorio, será necesaria la contribución de dichos elementos y deben, por lo tanto, diseñarse para resistir las acciones que el equilibrio global requeriría. Además, no se analizan los coeficientes de seguridad en aquellas fases en las que aparezcan forjados ya que se considera que la ejecución de la edificación no permite el desarrollo del círculo de deslizamiento.
- Para el caso de pantallas genéricas, no se contemplan círculos que le atraviesen y su peso específico se considera nulo.
- Se tienen en cuenta las acciones en coronación a los efectos de tomar momentos respecto del centro del círculo de deslizamiento que se analice.
- El coeficiente sísmico horizontal (fracción de la aceleración de la gravedad) se considera uniforme en altura.

- Se asume que las sobrecargas en el terreno tienen una difusión en profundidad de 30 grados respecto de la vertical.
- Se considera que la resistencia que el elemento de contención posee en la superficie de corte con cualquier círculo de deslizamiento, es el valor de la resistencia característica a corte del material que especifica la norma correspondiente o, en su lugar, la resistencia característica de tracción en el caso de que ésta no especifique el valor de dicha resistencia característica a corte. Para elementos de hormigón, se consideran las resistencias correspondientes al caso de hormigón en masa.
- No se consideran las tensiones del terreno producidas por el elemento de contención y sus cargas en coronación, sobre la superficie de deslizamiento en estudio. Esta situación, en general, es conservadora por lo que se obtendrá un valor del coeficiente de seguridad menor al que se obtendría si se considerasen dichas presiones. En general, salvo cargas de valor importante aplicadas al elemento, la diferencia de valores de los coeficientes será pequeña.
- Para las combinaciones con sismo, se realiza un análisis estático y se consideran las acciones horizontales producidas por las masas del sistema terreno – NF - elemento de contención, multiplicadas por el valor de la aceleración sísmica definida por el usuario y los vectores de las cargas de coronación correspondientes a la combinación con sismo. No se tiene en cuenta que la aceleración sísmica afecte a las sobrecargas definidas.

2.2. Adecuación del método de las fajas o rebanadas. (Método simplificado de Bishop)

El método arriba descrito, se ha adecuado a las condiciones más variadas y complejas que se presentan en el estudio del círculo de deslizamiento pésimo en estructuras de contención; para ello se ha seguido el criterio de la referencia bibliográfica II.

Resulta así, que la ecuación (1) pasa a la siguiente ecuación (3):

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}\left[\frac{c_i \times b_i + (W_i + Wh_i + Q_i - u_i \times b_i) \times tg\phi_i}{m\alpha_i}\right] + \frac{M\tau_M}{R} + \frac{\sum_m ME_m}{R}}{\sum_{i=1}^{i=n}\left[(W_i + Wh_i) \times sen\alpha_i\right] + \frac{\sum_k MD_k}{R}} \quad (3)$$

donde,

$$m\alpha_i = \cos\alpha_i \times \left(1 + \frac{tg\phi_i \times tg\alpha_i}{F}\right) \quad (4)$$

Sólo se consideran en el equilibrio de la masa deslizante, aquellas fajas que cumplen con la inecuación:

$$\left(1 + \frac{tg\phi_i \times tg\alpha_i}{F}\right) \geq 0.10 \quad (5)$$

b_i : ancho de la faja "i" (se toma el valor mínimo entre R/10 y 1.00 m).

c_i : valor de la cohesión del terreno en el punto medio de la base de la faja "i".

$tg\ \phi_i$: valor de la tangente del ángulo de rozamiento interno del terreno en el punto medio de la base de la faja "i".

α_i : valor del ángulo que forma la recta que une el centro del círculo con el punto medio de la base de la faja "i" respecto a la vertical.

W_i: suma del peso de todos los estratos de terreno que gravitan sobre el punto medio de la base de la faja "i". Se consideran las densidades aparentes o sumergidas del terreno según estén por encima o por debajo del NF.

Wh_i: peso de agua ubicada por encima de la superficie de la faja "i" si existiese NF.

Q_i: resultante de la presión que producen las sobrecargas actuante en el terreno sobre el punto medio de la base de la faja "i".

u_i : valor de la sobrepresión de poros en el punto medio de la base de la faja "i". Este valor es nulo ya que el programa considera que la presión de poros es igual al valor de la presión hidrostática.

$M\tau_M$: momento producido por la resistencia al corte del elemento de contención respecto al centro del círculo, cuando éste le atraviesa.

$\sum MD_k$: suma de los "k" momentos de las acciones exteriores desequilibrantes respecto al centro del círculo.

$\sum ME_m$: suma de los "m" momentos de las acciones exteriores equilibrantes respecto al centro del círculo.

Como se comentó antes, la ecuación anterior, es del tipo implícita en F, por lo que se resuelve mediante iteraciones sucesivas. En general, la convergencia a un valor final del coeficiente de seguridad es rápida, no obstante, si el número de iteraciones alcanza el valor límite adoptado en 50 iteraciones, el programa muestra un mensaje en el listado de comprobaciones. Se alcanza ese valor límite de iteraciones cuando el sistema presenta alguna situación particular que inestabiliza la convergencia al equilibrio (por ejemplo densidades de terreno singulares, etc.)

Las iteraciones terminan cuando la diferencia entre el valor del coeficiente de seguridad calculado en la iteración "j" , y el calculado en la iteración "j+1" es menor o igual a 0.001 ($|F_j - F_{j+1}| \leq 0.001$).

2.3. Proceso de cálculo

El procedimiento empleado por el programa para la determinación del círculo cuyo coeficiente de seguridad es mínimo, consiste en definir una primera malla de puntos en el plano de la sección transversal en estudio, que serán los centros de los círculos que se analizarán. Esta primer malla de centros cubre un ancho horizontal de 4 veces la altura de contención y un alto en vertical de 2 veces la altura de contención. En el caso de que el terreno tenga banqueta en el trasdós, se incrementa la altura de la malla sumándole 2 veces la altura de dicha banqueta. El número de divisiones de cada lado de esta primera malla es de 10.

Una vez calculado el conjunto de círculos representativos en cada nudo de la malla, se determina aquel punto "P1" de la misma que posee el menor coeficiente de seguridad. Luego se define otra malla de menores dimensiones, cuyo centro es el mencionado punto "P1" y se procede de la misma manera, hasta obtener para el punto "P2" el coeficiente mínimo. Así hasta alcanzar el número de 3 mallas, ciclos o aproximaciones, obteniendo al final de todos los círculos propuestos, el coeficiente de seguridad mínimo de todos los calculados, cuyo centro será el punto "P3" de la tercera iteración. Las dimensiones de la 2ª y 3ª malla son 0.40 veces la dimensiones de la malla anterior, y el número de divisiones de cada lado de ellas es de 6.

En cada punto de la malla se trazan círculos de radios crecientes, partiendo de un radio mínimo tal que empotre en el terreno 0.50 m hasta un radio máximo que resulta ser el mayor de:

- radio mínimo + 2 metros.
- radio tal que alcance la cota del estrato más profundo + 2 veces la altura de contención de tierras.
- radio tal que alcance la cota del punto más profundo del elemento de contención + altura de contención de tierras.

No obstante, existe un control que consiste en que una vez que el valor del radio alcance la cota del estrato más profundo que haya definido el usuario, y en 10 círculos consecutivos sus coeficientes de seguridad sean de valor

creciente, el programa no sigue profundizando con más círculos; en caso contrario, continua trazando círculos de mayor radio hasta que se cumpla dicha condición.

Antes de calcular el coeficiente de seguridad del círculo que se propone, se realizan distintos controles de validación del círculo. Esto es, se descartan círculos que penetren en roca, que no contengan un desnivel de terreno en su superficie, que tenga tramos que no corten terreno, que tengan su centro en una cota tal que intercepten con el terreno en puntos de cota superior al de dicho centro.

En las siguientes figuras se muestran estos círculos que se descartan.

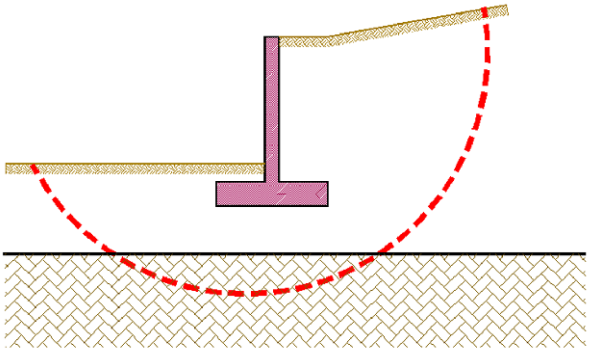

Fig. 2.1. Círculo no válido por penetrar en el manto rocoso.

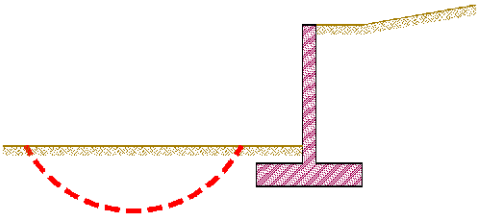

Fig. 2.2. Círculo no válido por no contener un desnivel de terreno.

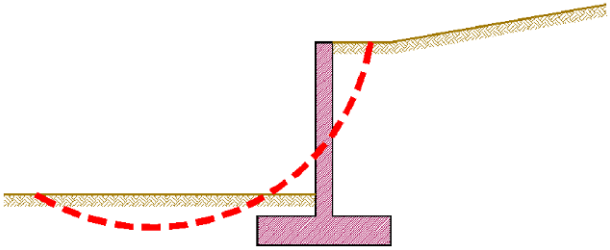

Fig. 2.3. Círculo no válido por tener un tramo que no corta el terreno.

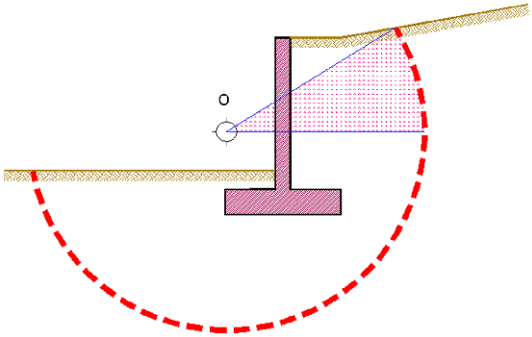

Fig. 2.4. Círculo no válido por tener en su centro una cota inferior a algunos puntos de intersección del círculo con el terreno.

3. Bibliografía de referencia

I. **MECÁNICA DE SUELOS EN LA INGENIERÍA PRÁCTICA.** Karl Terzaghi – Ralph B. Peck. Segunda Edición. Editorial El Ateneo S.A.

II. **RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS PARA EL PROYECTO DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS.** ROM 0.5.94. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.

III. **FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN.** Joseph E. Bowles. Quinta Edición. Editorial Mc Graw Hill.

IV. **GEOTECNIA Y CIMIENTOS. MECÁNICA DEL SUELO Y DE LAS ROCAS.** José A. Jiménez Salas. José L. de Justo Alpañes. Alcibiades A. Serrano González.

V. **CIMENTACIONES**. W.E. Schulze y K. Simmer. Editorial Blume.

4. Ejemplo nº 1. Muros en Ménsula de Hormigón Armado

4.1. Círculo de deslizamiento pésimo de un muro de contención en ménsula

4.1.1. Datos del problema

Observe el muro de la figura siguiente, se pretende comprobar el valor del coeficiente de seguridad mínimo que se ha obtenido mediante el uso del programa **Muros en Ménsula de Hormigón Armado**.

Utilizando el programa, se obtiene el valor del coeficiente de seguridad mínimo F = 1.696 y el mapa de isovalores del coeficiente de seguridad de los círculos de deslizamientos propuestos que se indican en la figura 4.2.

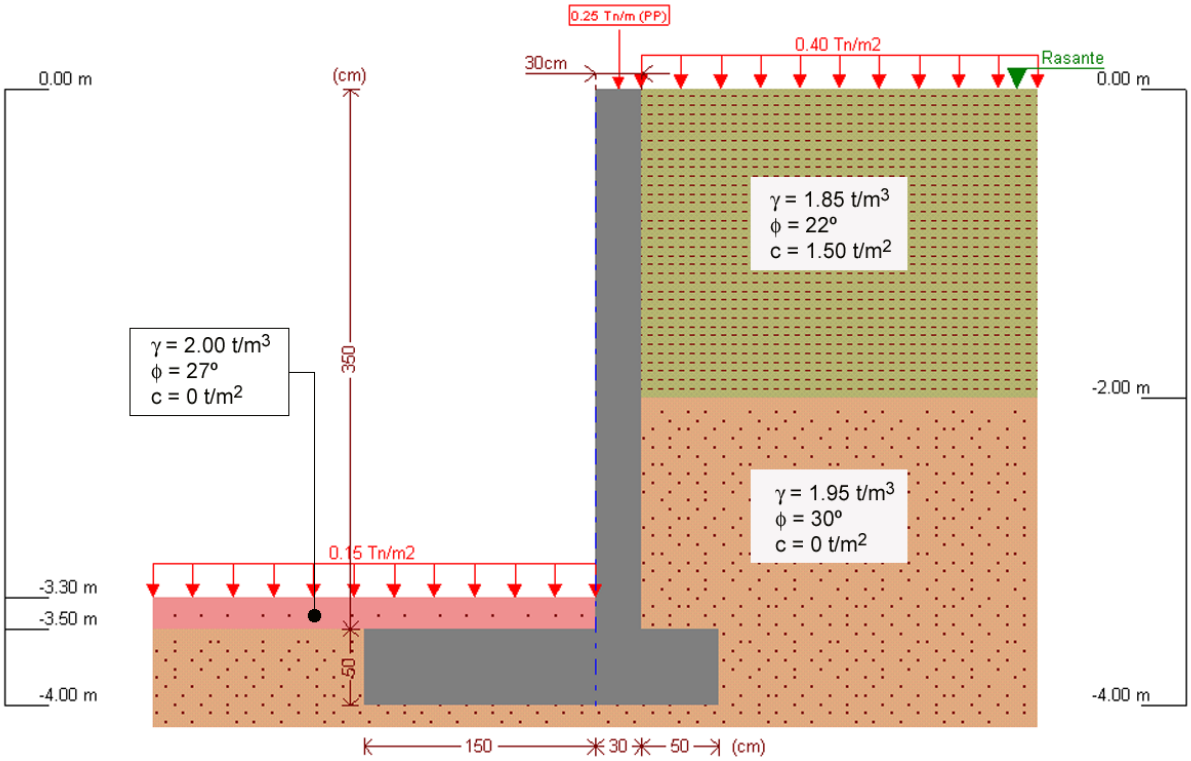

Fig. 4.1

4.1.2. Resultados del programa

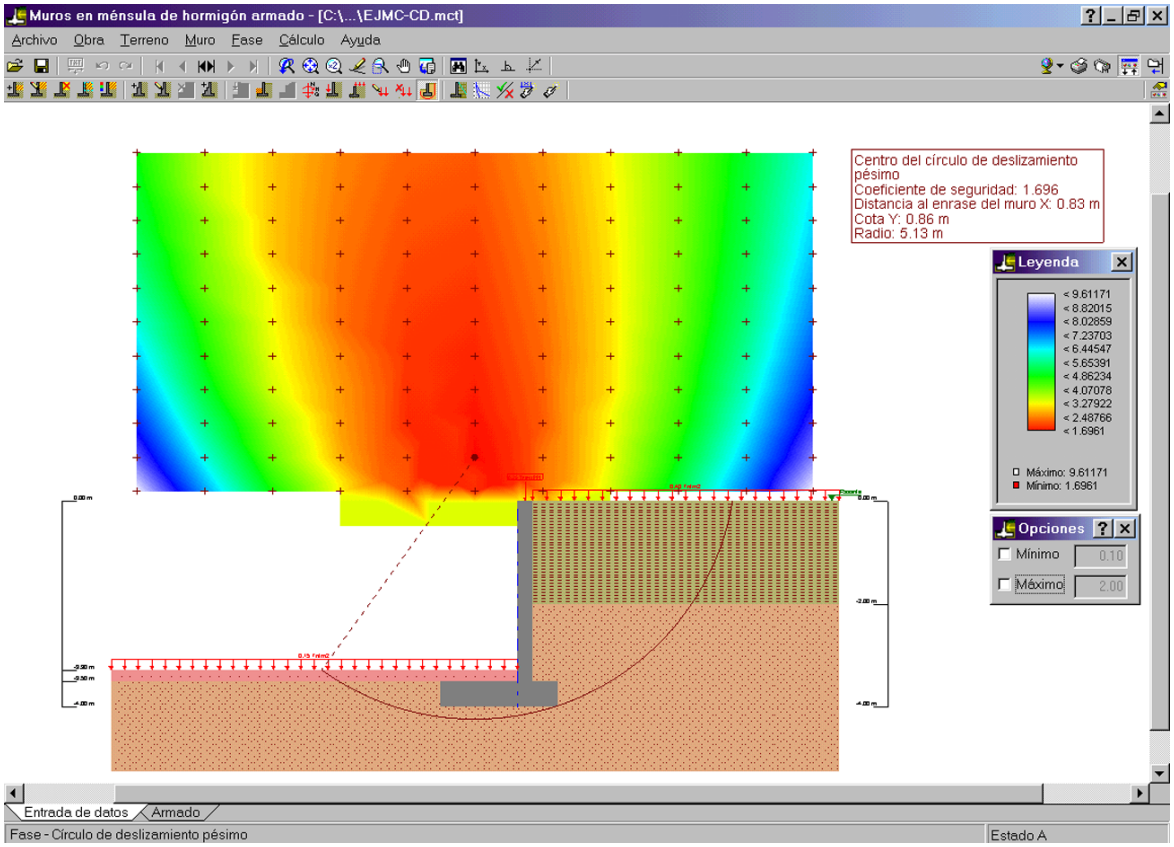

Fig. 4.2

Para desarrollar el problema, en primer lugar se traza sobre el perfil del terreno, el círculo de deslizamiento en cuestión. Luego, se subdivide la masa deslizante mediante fajas o rebanadas como se muestra en la figura 4.3.

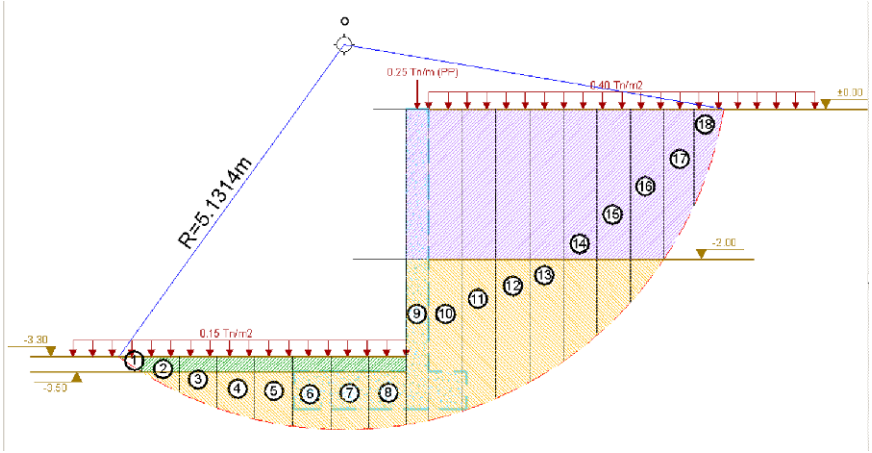

Fig. 4.3

4.1.3.Cálculos para comparar con los resultados del programa

El cálculo de comparación se desarrolla mediante una planilla de cálculo que permite llevar a cabo procesos iterativos para la determinación del coeficiente de seguridad del círculo que se está analizando.

Cálculo de momentos de los agentes distintos al terreno:

Muro

Área del muro (m) = 2.30 x 0.50 + 3.50 x 0.30 = 2.20 m^2

Peso específico del muro[1] = 0.60 t/m^3

Coordenada X de centro gravedad del muro=-0.11136 m

Momento del peso del muro =
=2.20m^2 x 0.60 t/m^3 x (0.825 m – 0.11136 m)=0.942 tm / m

[1] Se calcula el peso específico del muro como 2.50 t/m^2 menos el peso específico promedio ponderado del terreno en la altura del muro. Esto se hace porque como en el estudio de las fajas no se considera la existencia del muro, sólo debe computarse como efectiva la diferencia de peso entre muro y suelo.

Sobrecargas

- En trasdós

  Longitud de sobrecarga en trasdós dentro del círculo = (4.23384 m – 0.30 m) = 3.9338 m

  Resultante de la sobrecarga de trasdós =
  = 3.9338 m x 0.40 t/m^2 = 1.57354 t/m

  Momento de la sobrecarga de trasdós =
  = (0.50 x 3.9338 m + 0.30 + 0.825 m) x 1.57354 t/m =
  = 4.86526 tm/m

  Momento de las sobrecargas de trasdós / R =
  = 4.86526 tm/m / 5.1314 m = 0.94814 tm/m

- En intradós

  Longitud de sobrecarga en intradós dentro del círculo =
  = 3.8293 m

  Resultante de la sobrecarga de intradós =
  = 3.8293 m x 0.15 t/m^2 = 0.5744 t/m

  Momento de la sobrecarga de intradós =
  = (- 0.50 x 3.8293 m + 0.825 m) x 0.5744 t/m =
  = - 0.6259 tm/m

Momento de las sobrecargas de trasdós / R =
= -0.6259 tm/m / 5.1314 m = - 0.12197 tm/m

Momento de las sobrecargas / R =
= (4.86526 tm/m - 0.6259 tm/m) / 5.1314 m =
= 0.82616 tm/m

Cargas en coronación

Momento de la carga vertical en coronación =
= 0.25 t/m x (0.825 m + 0.15 m) = 0.24375 tm/m

Momento de la carga vertical en coronación / R =
= 0.24375 tm/m / 5.1314 m = 0.0475 tm/m

En la tabla siguiente se muestra la planilla de cálculo empleada para la comprobación, en la que aparecen los datos de las fajas y los valores arriba calculados.

Conclusiones

Como puede apreciarse, el cálculo de comparación arroja el mismo valor del coeficiente de seguridad para el círculo estudiado que el calculado mediante el programa, esto es:

Fs = 1.696

OBRA: EJMC-CD.MCT

Terreno superior Intrados	Terreno superior Trasdos
Cota = -3,30 m Ø = 27,0° γ = 2,00 t/m³ c = 0,00 t/m²	Cota = 0,00 m Ø = 22,0° γ = 1,85 t/m³ c = 1,50 t/m²
Terreno Inferior Intrados	**Terreno Inferior Trasdos**
Cota = -3,50 m Ø = 30,0° γ = 1,95 t/m³ c = 0,00 t/m²	Cota = -2,00 m Ø = 30,0° γ = 1,95 t/m³ c = 0,00 t/m²

Círculo Pésimo
X = -0,825 m
Cota = 0,860 m
R = 5,131 m

Momento peso efectivo del muro= 0,184 tm/m
Momento de las sobrecargas de trasdós = 0,948 tm/m
Momento de las sobrecargas de intradós = -0,122 tm/m
Momento resultante sobrecargas = 0,826 tm/m
Momento carga coronación = 0,048 tm/m
} Momentos de radio unitario

Coef. Seg = 1,696

Faja Nº	X [m]	Cota [m]	Zona	b [m]	α [°]	tg α	cos α	sen α	W [t/m]	Δ sobrec [t/m]	c * b [t/m]	tg Ø	g Ø*(W+Δsobrec) [t/m]	m α	Numerador	Denominador
1	-3,6801	-3,4000	Intrados	0,2984	-33,8306°	-0,67022	0,83069	-0,55674	0,0597	0,0448	0,0000	0,50953	0,0532	0,6634	0,0802	-0,0332
2	-3,2787	-3,6376	Intrados	0,5044	-28,6151°	-0,54556	0,87786	-0,47892	0,3371	0,0757	0,0000	0,57735	0,2383	0,7148	0,3334	-0,1614
3	-2,7743	-3,8789	Intrados	0,5044	-22,3590°	-0,41133	0,92482	-0,38041	0,5745	0,0757	0,0000	0,57735	0,3754	0,7953	0,4720	-0,2185
4	-2,2699	-4,0568	Intrados	0,5044	-16,3762°	-0,29387	0,95943	-0,28194	0,7494	0,0757	0,0000	0,57735	0,4764	0,8635	0,5517	-0,2113
5	-1,7654	-4,1780	Intrados	0,5044	-10,5733°	-0,18666	0,98302	-0,18349	0,8686	0,0757	0,0000	0,57735	0,5452	0,9206	0,5922	-0,1594
6	-1,2610	-4,2466	Intrados	0,5044	-4,8805°	-0,08539	0,99637	-0,08508	0,9361	0,0757	0,0000	0,57735	0,5842	0,9674	0,6038	-0,0796
7	-0,7566	-4,2648	Intrados	0,5044	0,7647°	0,01335	0,99991	0,01335	0,9540	0,0757	0,0000	0,57735	0,5945	1,0045	0,5918	0,0127
8	-0,2522	-4,2330	Intrados	0,5044	6,4169°	0,11247	0,99373	0,11176	0,9228	0,0757	0,0000	0,57735	0,5765	1,0318	0,5587	0,1031
9	0,1500	-4,1756	Trasdos	0,3000	10,9580°	0,19362	0,98177	0,19009	2,3827	0,1200	0,0000	0,57735	1,4450	1,0465	1,3808	0,4529
10	0,5240	-4,0855	Trasdos	0,4479	15,2572°	0,27277	0,96475	0,26315	3,4789	0,1792	0,0000	0,57735	2,1120	1,0543	2,0032	0,9155
11	0,9719	-3,9406	Trasdos	0,4479	20,5213°	0,37431	0,93654	0,35056	3,3524	0,1792	0,0000	0,57735	2,0389	1,0559	1,9311	1,1752
12	1,4198	-3,7476	Trasdos	0,4479	25,9752°	0,48720	0,89898	0,43798	3,1838	0,1792	0,0000	0,57735	1,9416	1,0481	1,8526	1,3945
13	1,8678	-3,5002	Trasdos	0,4479	31,6984°	0,61758	0,85083	0,52545	2,9677	0,1792	0,0000	0,57735	1,8169	1,0297	1,7645	1,5594
14	2,3157	-3,1881	Trasdos	0,4479	37,8057°	0,77584	0,79009	0,61299	2,6951	0,1792	0,0000	0,57735	1,6595	0,9987	1,6616	1,6521
15	2,7636	-2,7944	Trasdos	0,4479	44,4794°	0,98199	0,71350	0,70065	2,3512	0,1792	0,0000	0,57735	1,4609	0,9520	1,5346	1,6474
16	3,2115	-2,2873	Trasdos	0,4479	52,0569°	1,28256	0,61488	0,78862	1,9082	0,1792	0,0000	0,57735	1,2052	0,8833	1,3644	1,5049
17	3,6351	-1,6446	Trasdos	0,3992	60,6835°	1,78078	0,48963	0,87193	1,2145	0,1597	0,5988	0,40403	0,5552	0,6973	1,6548	1,0589
18	4,0343	-0,6446	Trasdos	0,3992	72,7958°	3,22963	0,29578	0,95526	0,4760	0,1597	0,5988	0,40403	0,2568	0,5233	1,6349	0,4547
														Sumatorias-->	20,5662	11,0678
															20,566	**12,125**

Coef. Seg = 1,696
Tolerancia 0,0000

Fig. 4.4

5. Ejemplo nº 2. Muros Pantalla

5.1. Círculo de deslizamiento pésimo en una fase cualquiera de un muro pantalla

5.1.1. Datos del problema

Observe el muro pantalla de la figura siguiente, se pretende comprobar el valor del coeficiente de seguridad mínimo que se ha obtenido mediante el uso del programa **Muros Pantalla**.

Utilizando el programa, se obtiene el valor del coeficiente de seguridad mínimo F = 3.723 y el mapa de isovalores del coeficiente de seguridad de los círculos de deslizamientos propuestos que se indican en la figura 5.2.

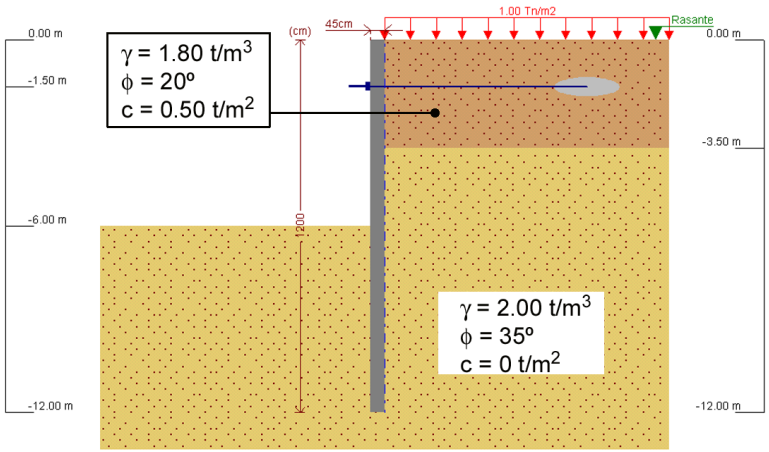

Fig. 5.1

5.1.2. Resultados del programa

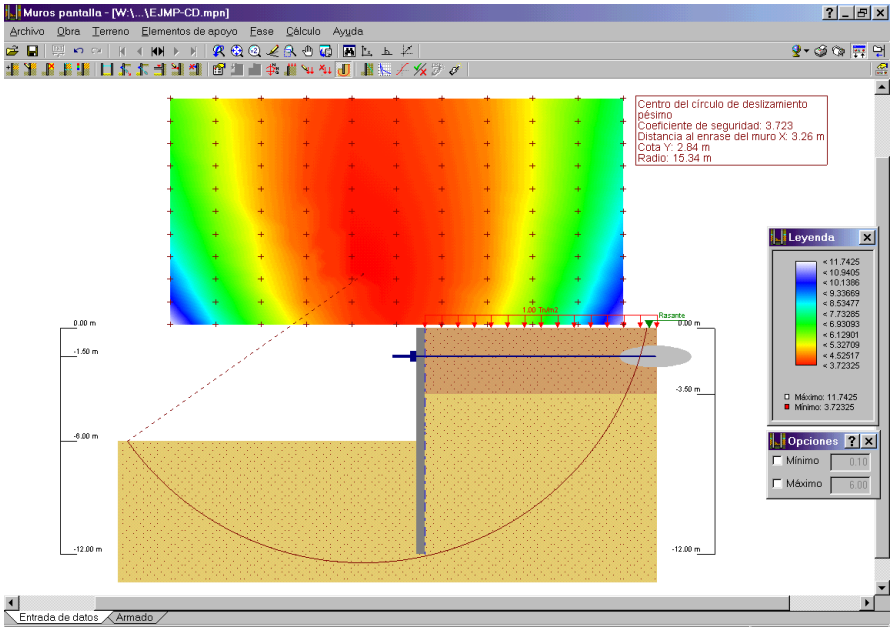

Fig. 5.2

Para desarrollar el problema, en primer lugar se traza sobre el perfil del terreno, el círculo de deslizamiento en cuestión. Luego, se subdivide la masa deslizante mediante fajas o rebanadas como se muestra en la figura 5.3.

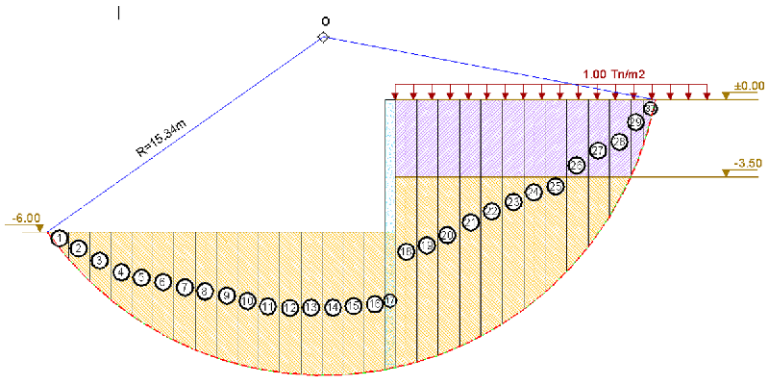

Fig. 5.3

5.1.3. Cálculos para comparar con los resultados del programa

Nuevamente, el cálculo de comparación se desarrolla mediante una planilla de cálculo que permite llevar a cabo procesos iterativos para el cálculo del coeficiente de seguridad del círculo que se está analizando.

Cálculo de momentos de los agentes distintos al terreno:

Muro

Área del muro = (0.45 x 12) m^2 = 5.40 m^2

Peso específico del muro[1] = 0.5583 t/m^3

Coordenada X del centro de gravedad del muro=-0.225 m

Momento del peso del muro =
= 5.40 m^2 x 0.5583 t/m^3 x (3.26 m – 0.225 m)= 9.15 tm / m.

[1] Se calcula el peso específico del muro como 2.50 t/m^2 menos el peso específico promedio ponderado del terreno en la altura del muro. Esto se hace porque como en el estudio de las fajas no se considera la existencia del muro, sólo debe computarse como efectiva la diferencia de peso entre muro y suelo.

Sobrecargas

- En trasdós

  Longitud de sobrecarga en trasdós dentro del círculo =
  = 11.8148 m

  Resultante de la sobrecarga de trasdós =
  = 11.8148 m x 1.00 t/m^2 = 11.8148 t/m

  Momento de la sobrecarga de trasdós =
  =(0.50 x 11.8148 m + 3.26m) x 11.8148 t/m =
  = 108.316 tm/m

  Momento de las sobrecargas de trasdós / R =
  = 108.316 tm/m / 15.34 m = 7.061 tm/m

En la tabla siguiente, se muestra la planilla de cálculo empleada para la comprobación, en la que aparecen los datos de las fajas y los valores arriba calculados.

Conclusiones

Como puede apreciarse, el cálculo de comparación arroja el mismo valor del coeficiente de seguridad para el círculo estudiado que el calculado mediante el programa, esto es:

Fs = 3.723

OBRA: EJMP-CD.MCT

Terreno superior Intrados	Terreno superior Trasdos
Cota = -10000,00 m Ø = 0,0° γ = 0,00 t/m³ c = 0,00 t/m²	Cota = 0,00 m Ø = 20,0° γ = 1,80 t/m³ c = 0,50 t/m²
Terreno Inferior Intrados	**Terreno Inferior Trasdos**
Cota = -6,00 m Ø = 35,0° γ = 2,00 t/m³ c = 0,00 t/m²	Cota = -3,50 m Ø = 35,0° γ = 2,00 t/m³ c = 0,00 t/m²

Círculo Pésimo
X = -3,260 m
Cota = 2,840 m
R = 15,340 m

Momento peso efectivo del muro= 0,597 tm/m
Momento de las sobrecargas de trasdós = 7,061 tm/m
Momento de las sobrecargas de intradós = 0,000 tm/m
Momento resultante sobrecargas = 7,061 tm/m
Momento carga coronación = 0,000 tm/m
} Momentos de radio unitario

Coef. Seg = 3,723

Faja Nº	X [m]	Cota [m]	Zona	b [m]	α [°]	tg α	cos α	sen α	W [t/m]	Δ sobrec [t/m]	c * b [t/m]	tg Ø	tg Ø*(W+Δsobrec) [t/m]	m α	Numerador	Denominador
1	-15,3172	-6,6118	Intrados	0,9592	-51,9066°	-1,27565	0,61695	-0,78701	1,1736	0,0000	0,0000	0,70021	0,8218	0,4689	1,7524	-0,9236
2	-14,3580	-7,7272	Intrados	0,9592	-46,4033°	-1,05023	0,68958	-0,72421	3,3134	0,0000	0,0000	0,70021	2,3201	0,5534	4,1925	-2,3996
3	-13,3988	-8,6540	Intrados	0,9592	-41,4155°	-0,88210	0,74993	-0,66152	5,0912	0,0000	0,0000	0,70021	3,5649	0,6255	5,6990	-3,3679
4	-12,4397	-9,4356	Intrados	0,9592	-36,7889°	-0,74779	0,80085	-0,59887	6,5907	0,0000	0,0000	0,70021	4,6149	0,6882	6,7054	-3,9470
5	-11,4805	-10,0990	Intrados	0,9592	-32,4289°	-0,63533	0,84406	-0,53625	7,8632	0,0000	0,0000	0,70021	5,5059	0,7432	7,4082	-4,2167
6	-10,5213	-10,6616	Intrados	0,9592	-28,2719°	-0,53781	0,88071	-0,47366	8,9425	0,0000	0,0000	0,70021	6,2616	0,7916	7,9097	-4,2357
7	-9,5621	-11,1358	Intrados	0,9592	-24,2722°	-0,45093	0,91160	-0,41107	9,8521	0,0000	0,0000	0,70021	6,8985	0,8343	8,2687	-4,0499
8	-8,6030	-11,5303	Intrados	0,9592	-20,3954°	-0,37181	0,93731	-0,34850	10,6091	0,0000	0,0000	0,70021	7,4285	0,8718	8,5212	-3,6972
9	-7,6438	-11,8517	Intrados	0,9592	-16,6143°	-0,29839	0,95825	-0,28593	11,2256	0,0000	0,0000	0,70021	7,8603	0,9045	8,6904	-3,2097
10	-6,6846	-12,1047	Intrados	0,9592	-12,9066°	-0,22915	0,97474	-0,22336	11,7110	0,0000	0,0000	0,70021	8,2001	0,9327	8,7915	-2,6158
11	-5,7255	-12,2928	Intrados	0,9592	-9,2534°	-0,16292	0,98699	-0,16080	12,0717	0,0000	0,0000	0,70021	8,4527	0,9567	8,8348	-1,9411
12	-4,7663	-12,4183	Intrados	0,9592	-5,6379°	-0,09872	0,99516	-0,09824	12,3124	0,0000	0,0000	0,70021	8,6212	0,9767	8,8270	-1,2096
13	-3,8071	-12,4827	Intrados	0,9592	-2,0449°	-0,03571	0,99936	-0,03568	12,4361	0,0000	0,0000	0,70021	8,7078	0,9927	8,7723	-0,4438
14	-2,8479	-12,4870	Intrados	0,9592	1,5400°	0,02688	0,99964	0,02687	12,4442	0,0000	0,0000	0,70021	8,7135	1,0047	8,6728	0,3344
15	-1,8888	-12,4310	Intrados	0,9592	5,1310°	0,08979	0,99599	0,08943	12,3368	0,0000	0,0000	0,70021	8,6384	1,0128	8,5291	1,1033
16	-0,9296	-12,3142	Intrados	0,9592	8,7424°	0,15378	0,98838	0,15199	12,1128	0,0000	0,0000	0,70021	8,4814	1,0170	8,3400	1,8410
17	-0,2250	-12,1950	Intrados	0,4500	11,4124°	0,20186	0,98023	0,19787	5,5755	0,0000	0,0000	0,70021	3,9040	1,0174	3,8371	1,1032
18	0,4868	-12,0269	Trasdos	0,9735	14,1451°	0,25202	0,96968	0,24438	22,7350	0,9735	0,0000	0,70021	16,6009	1,0156	16,3453	5,5559
19	1,4603	-11,7467	Trasdos	0,9735	17,9315°	0,32360	0,95143	0,30788	22,1895	0,9735	0,0000	0,70021	16,2189	1,0093	16,0691	6,8317
20	2,4338	-11,3945	Trasdos	0,9735	21,8012°	0,40000	0,92848	0,37139	21,5038	0,9735	0,0000	0,70021	15,7388	0,9983	15,7652	7,9862
21	3,4073	-10,9847	Trasdos	0,9735	25,7791°	0,48297	0,90048	0,43490	20,6670	0,9735	0,0000	0,70021	15,1528	0,9823	15,4264	8,9881
22	4,3808	-10,4498	Trasdos	0,9735	29,8961°	0,57493	0,86693	0,49843	19,6644	0,9735	0,0000	0,70021	14,4508	0,9607	15,0425	9,8013
23	5,3543	-9,8393	Trasdos	0,9735	34,1921°	0,67940	0,82716	0,56197	18,4757	0,9735	0,0000	0,70021	13,6184	0,9328	14,5989	10,3828
24	6,3278	-9,1183	Trasdos	0,9735	38,7215°	0,80177	0,78020	0,62554	17,0719	0,9735	0,0000	0,70021	12,6356	0,8978	14,0734	10,6791
25	7,3013	-8,2651	Trasdos	0,9735	43,5621°	0,95103	0,72463	0,68914	15,4108	0,9735	0,0000	0,70021	11,4724	0,8542	13,4302	10,6202
26	8,2748	-7,2455	Trasdos	0,9735	48,8349°	1,14370	0,65823	0,75282	13,4256	0,9735	0,0000	0,70021	10,0824	0,7998	12,6061	10,1070
27	9,2483	-6,0001	Trasdos	0,9735	54,7497°	1,41495	0,57715	0,81664	11,0008	0,9735	0,0000	0,70021	8,3845	0,7307	11,4742	8,9836
28	10,2218	-4,4057	Trasdos	0,9735	61,7445°	1,86066	0,47340	0,88085	7,8964	0,9735	0,0000	0,70021	6,2108	0,6391	9,7188	6,9555
29	10,9851	-2,8017	Trasdos	0,5531	68,3943°	2,52498	0,36822	0,92974	2,7895	0,5531	0,2766	0,36397	1,2166	0,4591	3,2524	2,5935
30	11,5382	-1,0517	Trasdos	0,5531	75,2659°	3,80255	0,25433	0,96712	1,0471	0,5531	0,2766	0,36397	0,5824	0,3489	2,4622	1,0127
														Sumatorias-->	284,0169	68,6221
															284,017	**76,279**

Coef. Seg = 3,723
Tolerancia 0,0000

Fig. 5.4