



Software para Arquitetura,
Engenharia e Construção



Elementos de **contenção**

Manual do utilizador

Memória de cálculo/Exemplo prático
Círculo mais desfavorável



IMPORTANTE: ESTE TEXTO REQUER A SUA ATENÇÃO E A SUA LEITURA

A informação contida neste documento é propriedade da CYPE Ingenieros, S.A. e nenhuma parte dela pode ser reproduzida ou transferida sob nenhum conceito, de nenhuma forma e por nenhum meio, quer seja eletrónico ou mecânico, sem a prévia autorização escrita da CYPE Ingenieros, S.A.

Este documento e a informação nele contida são parte integrante da documentação que acompanha a Licença de Utilização dos programas informáticos da CYPE Ingenieros, S.A. e da qual são inseparáveis. Por conseguinte, está protegida pelas mesmas condições e deveres. Não esqueça que deverá ler, compreender e aceitar o Contrato de Licença de Utilização do software, do qual esta documentação é parte, antes de utilizar qualquer componente do produto. Se NÃO aceitar os termos do Contrato de Licença de Utilização, devolva imediatamente o software e todos os elementos que o acompanham ao local onde o adquiriu, para obter um reembolso total.

Este manual corresponde à versão do software denominada pela CYPE Ingenieros, S.A. como Elementos de contenção – Cálculo do círculo mais desfavorável. A informação contida neste documento descreve substancialmente as características e métodos de manuseamento do programa ou programas informáticos que acompanha. O software que este documento acompanha pode ser submetido a modificações sem prévio aviso.

Para seu interesse, a CYPE Ingenieros, S.A. dispõe de outros serviços, entre os quais se encontra o de Atualizações, que lhe permitirá adquirir as últimas versões do software e a documentação que o acompanha. Se tiver dúvidas relativamente a este texto ou ao Contrato de Licença de Utilização do software, pode dirigir-se ao seu Distribuidor Autorizado Top-Informática, Lda., na direção:

Rua Comendador Santos da Cunha, 304
4700-026 Braga
Tel: 00 351 253 20 94 30
<http://www.topinformatica.pt>

Traduzido e adaptado pela Top-Informática, Lda para a
© CYPE Ingenieros, S.A.
Setembro de 2023

Windows® é marca registada de Microsoft Corporation®

Índice

1. Introdução.....	6
1.1. Fenómeno de estabilidade global	6
1.2. Cálculo do coeficiente de segurança perante o deslizamento circular	6
1.3. Métodos de cálculo	7
1.4. Método das faixas ou fatias (Método simplificado de Bishop)	8
2. Considerações e métodos de cálculo	9
2.1. Hipóteses de cálculo	9
2.2. Adequação do método das faixas ou fatias. (Método simplificado de Bishop)	10
2.3. Processo de cálculo	11
3. Exemplo nº 1. StruBIM Cantilever Walls	13
3.1. Círculo de deslizamento desfavorável de um muro de contenção em consola	13
3.1.1. Dados do problema	13
3.1.2. Resultados do programa	14
3.1.3. Cálculo para comparar com os resultados do programa	14
4. Exemplo nº 2. StruBIM Embedded Walls	17
4.1. Círculo de deslizamento desfavorável numa fase qualquer de uma contenção periférica	17
4.1.1. Dados do problema	17
4.1.2. Resultados do programa	18
4.1.3. Cálculo para comparar com os resultados do programa	18

Nota prévia

Devido à implementação de novas funcionalidades e melhorias no StruBIM Cantilever Walls e no StruBIM Embedded Walls, é possível que pontualmente surjam imagens ou textos que não correspondam à versão atual. Em caso de dúvida consulte a Assistência Técnica em <https://www.topinformatica.pt/>.

Apresentação

Manual de apoio sobre o cálculo do círculo mais desfavorável relativo aos programas StruBIM Cantilever Walls e StruBIM Embedded Walls.

1. Introdução

1.1. Fenómeno de estabilidade global

Como consequência do desnível que os elementos de contenção geram, o terreno apresenta uma tendência para se nivelar, pelo que se induz na massa do terreno um possível problema de instabilidade global ao qual se oporá a resistência ao esforço transversal do terreno.

Este tipo de instabilidade pode classificar-se em dois grandes grupos: **desprendimentos** (a massa instável cai) e **corrimentos** (a massa instável desloca-se). Este último, um caso típico é o do deslizamento, no qual uma massa do solo desliza em relação a outra quando a resistência ao esforço transversal é superada ao longo da zona que as separa. Este deslizamento poderá seguir superfícies de forma plana, curva, quebrada ou uma combinação delas.

Por conseguinte, em toda a estrutura de contenção deverá verificar-se a segurança perante fenómenos de estabilidade global.

Na prática, geralmente estudam-se superfícies de deslizamento circulares, pelo que será necessário determinar o círculo que exija a maior resistência do terreno ou, que é o mesmo, que possua um coeficiente de segurança mínimo perante o deslizamento circular, sendo este coeficiente a relação entre a resistência ao esforço transversal do terreno em rotura e a resistência ao esforço transversal que o mesmo deve desenvolver.

As forças que tendem a destabilizar uma determinada massa de solo são, principalmente, o seu próprio peso, o do elemento de contenção, as sobrecargas contidas dentro do círculo, a excitação sísmica e qualquer outra ação externa desestabilizadora.

Para levar a cabo a determinação do círculo de deslizamento desfavorável, deverão conhecer-se os dados do problema, isto é, o desnível (talude), as características do elemento de contenção, a estratigrafia, o conjunto de cargas sobre o sistema elemento de contenção – terreno e por último a escolha de um método cuja formulação se adequa ao problema em questão. As figuras seguintes esquematizam o problema de estabilidade global que aqui se trata.

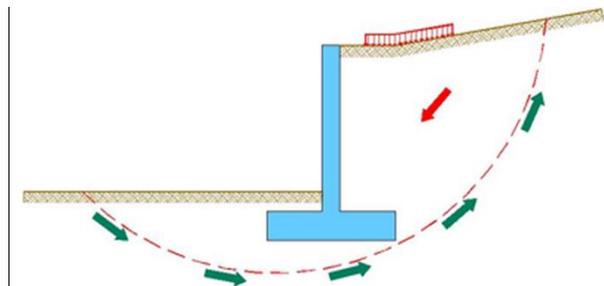


Fig. 1.1

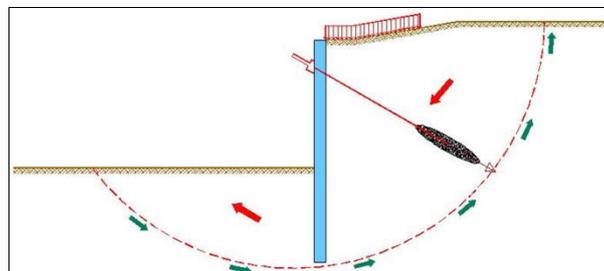


Fig. 1.2

1.2. Cálculo do coeficiente de segurança perante o deslizamento circular

Como se comentou anteriormente, o coeficiente de segurança que uma massa de solo potencialmente instável tem perante um fenómeno de deslizamento circular, pode avaliar-se como a relação entre o efeito das ações estabilizadoras perante o efeito das ações desestabilizadoras.

Quantitativamente pode expressar-se em termos de momentos como:

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

Onde:

$\sum ME$: somatório dos momentos produzidos pelas ações **estabilizadoras** em relação ao centro do círculo em estudo.

$\sum MD$: somatório dos momentos produzidos pelas ações **desestabilizadoras** em relação ao centro do círculo em estudo.

Este coeficiente de segurança poderá associar-se a distintos parâmetros, como são a resistência do terreno, o valor das sobrecargas, à excitação sísmica, etc., conforme os valores que se utilizam desses parâmetros na formulação. Isto é, que o coeficiente de segurança obtido valorizará a resistência ao esforço transversal exigida ao terreno, ou o excesso de sobrecarga que pode atuar sobre o terreno, ou a máxima excitação sísmica aceiteada pelo sistema, etc.

1.3. Métodos de cálculo

Atualmente, existem diversos métodos para o cálculo do coeficiente de segurança de uma massa potencialmente instável perante fenómenos de deslizamento circular. Geralmente, estes métodos consistem em propor uma superfície de deslizamento e estudar o seu equilíbrio, em função do sistema de ações que se desenvolvem. Este estudo parte de subdividir a massa do terreno deslizante em pequenas porções de formas geométricas, tais que permitam um cálculo simples das ações às quais estas se vêm submetidas.

Uma vez identificadas as ações sobre a massa do terreno e baseando-se numa série de hipóteses, estabelecem-se as equações de equilíbrio correspondente, das quais, com um prévio cálculo mais ou menos complexo segundo o método utilizado, se obterá o valor do coeficiente de segurança do círculo em estudo.

Este procedimento repete-se sucessivamente para um número suficientemente significativo de círculos possíveis de deslizamento variando tanto o raio como a sua posição no espaço. Cada um deles arrojará um coeficiente de segurança, sendo o mínimo deles, o coeficiente de segurança do sistema.

Para o traçado de todos estes círculos, normalmente utiliza-se uma malha ortogonal X-Y como base, na qual em cada ponto da mesma, se traçam todos e cada um dos círculos possíveis de deslizamento com raios crescentes. Na figura 1.3 mostra-se um círculo genérico de raio "R" cujo centro é o ponto "o" dessa malha ortogonal.

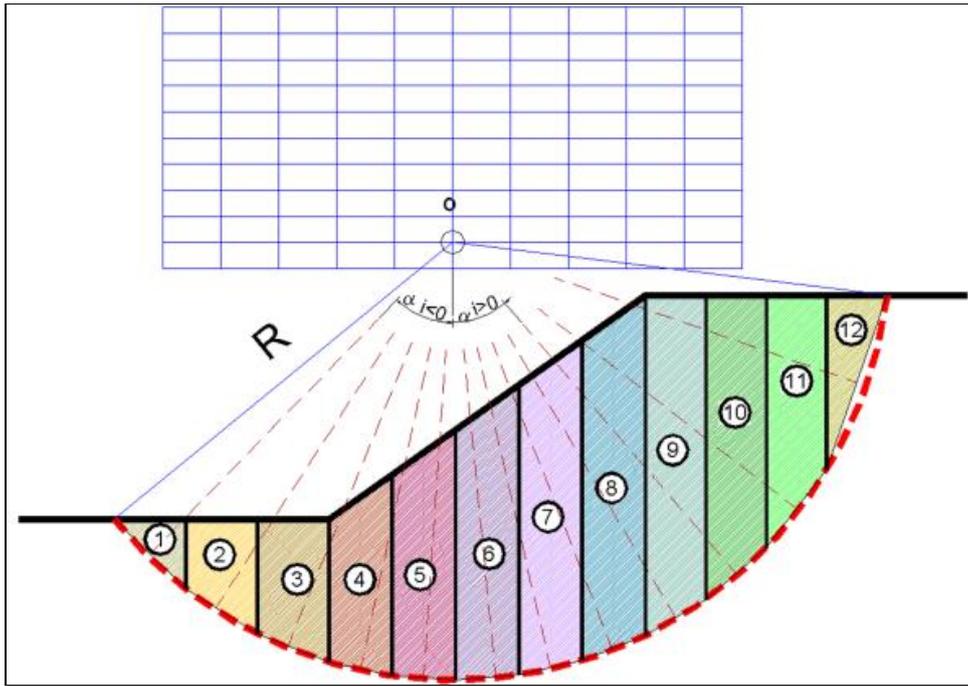


Fig. 1.3

1.4. Método das faixas ou fatias (Método simplificado de Bishop)

Este método consiste em analisar o equilíbrio de uma massa do terreno que segue uma superfície de deslizamento circular; para isso traça-se um círculo sobre a secção transversal do terreno e subdivide-se a massa deslizante contida nesse círculo, em faixas ou fatias.

Baseando-se no esquema de corpo livre de cada faixa genérica “i”, como o que se mostra na figura 1.4, apresenta-se a formulação matemática do método.

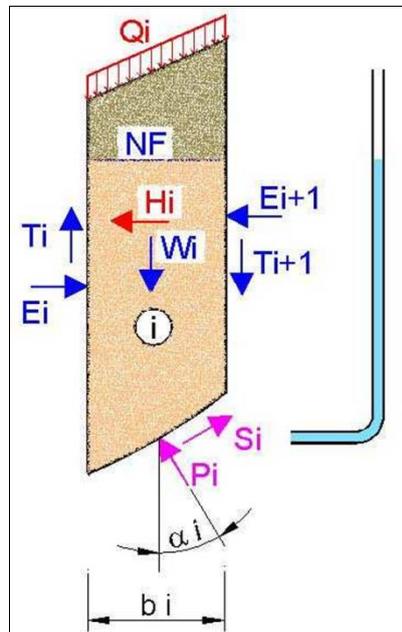


Fig. 1.4

Para um determinado talude, a equação utilizada para obter o coeficiente de segurança “F” de um círculo qualquer de raio R (que poderá ou não ter sobrecargas “Q”) é a seguinte¹:

¹ Para a obtenção da formulação e das suas hipóteses, recomenda-se consultar as referências bibliográficas I e IV indicadas a seguir.

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

onde,

$$m \alpha_i = \cos \alpha_i \times \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \phi_i x \operatorname{tg} \alpha_i}{F} \right) \quad [2]$$

b_i: largura da faixa “i”.

C_i: valor da coesão do terreno no ponto médio da base da faixa “i”.

tgφ_i: valor da tangente do ângulo de atrito interno do terreno no ponto médio da base da faixa “i”.

α_i: valor do ângulo que forma a reta que une o centro do círculo com o ponto médio da base da faixa “i” em relação à vertical.

W_i: soma do peso de todos os estratos de terreno que gravitam sobre o ponto médio da base da faixa “i”.

Q_i: resultante da pressão que as sobrecargas atuantes produzem no terreno sobre o ponto médio da base da faixa “i”.

U_i: valor da sobreposição de poros no ponto médio da base da faixa “i”.

Supõe-se que as forças entre faixas são de valor nulo, isto é, $\{\Delta T_i\} = 0$ y $\{\Delta E_i\} = 0$.

A equação anterior, é do tipo implícita em F, pelo que se resolve através de iterações sucessivas, partindo de um valor inicial de F=F1 que se introduz na equação [2] e compara-se com o valor F2 que se obtém da equação [1]. Se os valores de F1 e F2 não forem suficientemente aproximados entre si, procede-se a uma nova iteração partindo do valor de F2 com a equação [2] e assim sucessivamente, até à convergência de um valor final do coeficiente de segurança F.

2. Considerações e métodos de cálculo

2.1. Hipóteses de cálculo

Como em todas as análises, é necessário definir primeiramente as hipóteses ou suposições nas quais se fundamenta a mesma. Por isso, e para ter em conta situações particulares como a presença de um elemento de contenção, nível freático, cargas no coroamento, etc., resumem-se a seguir quais foram as hipóteses que se contemplaram no momento de calcular o círculo de deslizamento desfavorável.

- O método utilizado para o cálculo do coeficiente de segurança desfavorável é o **Método das faixas ou fatias** ou também chamado **Método simplificado de Bishop**, no qual se supõe que as forças entre faixas são de valor nulo, isto é $\{\Delta T_i\} = 0$ y $\{\Delta E_i\} = 0$. Para ver as limitações e validade do método, recomenda-se consultar a bibliografia de referência.
- O solo é homogéneo e não existe o predomínio de blocos na composição do mesmo.
- Considera-se que a resistência ao esforço transversal do terreno é a que a equação de Mohr-Coulomb indica, isto é, $\tau = c + (\sigma - \mu) \operatorname{tg} \phi$.
- Considera-se um estado de deformação plano pelo que se estuda uma unidade de largura do sistema.
- A massa instável segue uma potencial superfície de deslizamento de diretriz circular.
- Não se consideram fenómenos de desprendimentos ou desmoronamentos, nem de liquefação, nem a existência de irregularidades como diáclases, erosão por fluidos, escavação por correntes naturais, etc.
- Os estratos consideram-se perfeitamente horizontais em toda a sua extensão, e o estrato mais profundo assume-se de extensão semi-infinita em profundidade.
- A densidade do terreno de um estrato será aparente ou submersa conforme esse estrato se encontre acima ou abaixo do nível freático.
- Analisam-se os círculos profundos que penetrem no terreno, não os que penetrem num estrato rochoso.
- Não se consideram círculos que em parte fiquem no exterior, sem intercalar nenhum terreno.
- Não se consideram tensões de capilaridade na massa de solo.

- Considera-se o nível freático em equilíbrio horizontal.
- No caso de paredes moldadas, não se consideram as ações que as ancoragens e escoras produzem sobre a parede, isto é, que se analisa o equilíbrio sem a contribuição desses elementos. Se o coeficiente obtido com esta hipótese extrema for satisfatório, significará que a contribuição dos elementos de apoio não seria, em rigor, necessária. No caso do coeficiente obtido não ser satisfatório, será necessária a contribuição desses elementos e devem, por isso, desenhar-se para resistir as ações que o equilíbrio global requereria. Além disso, não se analisam os coeficientes de segurança nas fases em que apareçam lajes, uma vez que se considera que a execução da construção não permite o desenvolvimento do círculo de deslizamento.
- Para o caso de paredes genéricas, não se contemplam círculos que as atravessam e considera-se nulo o seu peso específico.
- Têm-se em conta as ações em coroamento para efeitos de considerar momentos em relação ao centro do círculo de deslizamento que se analise.
- O coeficiente sísmico horizontal (fração da aceleração da gravidade) considera-se uniforme em altura.
- Assume-se que as sobrecargas no terreno têm uma difusão em profundidade de 30 graus em relação à vertical.
- Considera-se que a resistência que o elemento de contenção possui na superfície de esforço transversal com qualquer círculo de deslizamento, é o valor da resistência característica ao corte do material que a norma correspondente especifica ou, no seu lugar, a resistência característica de tração no caso desta não especificar o valor dessa resistência característica ao esforço transversal. Para elementos de betão, consideram-se as resistências correspondentes ao caso de betão em massa.
- Não se consideram as tensões do terreno produzidas pelo elemento de contenção e suas cargas no coroamento, sobre a superfície de deslizamento em estudo. Esta situação, geralmente, é conservadora pelo que se obterá um valor do coeficiente de segurança menor do que o que se obteria se se considerassem essas pressões. Geralmente, salvo cargas de valor importante aplicadas ao elemento, a diferença de valores dos coeficientes será pequena.
- Para as combinações com sismo, realiza-se uma análise estática e consideram-se as ações horizontais produzidas pelas massas do sistema terreno – NF – elemento de contenção, multiplicadas pelo valor da aceleração sísmica definida pelo utilizador e os vetores das cargas de coroamento correspondentes à combinação com sismo. Não se tem em conta que a aceleração sísmica afete as sobrecargas definidas.

2.2. Adequação do método das faixas ou fatias. (Método simplificado de Bishop)

Adequou-se o método acima descrito às condições mais variadas e complexas que se apresentam no estudo do círculo de deslizamento desfavorável em estruturas de contenção; para isso seguiu-se o critério da referência bibliográfica II.

Resulta assim, que a equação [1] passa à seguinte equação [3]:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{c_i x b_i + (W_i + W h_i + Q_i - u_i x b_i) x \operatorname{tg} \phi_i}{m \alpha_i} \right] + \frac{M_{\tau M}}{R} + \frac{\sum_m M E_m}{R}}{\sum_{i=1}^{i=n} \left[(W_i + W h_i) x \operatorname{sen} \alpha_i \right] + \frac{\sum_k M D_k}{R}} \quad [3]$$

onde,

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

Só se consideram no equilíbrio da massa deslizante, as faixas que cumprem com a inequação:

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

b_i: largura da faixa “i” (toma-se o valor mínimo entre R/10 e 1.00 m).

c_i: valor da coesão do terreno no ponto médio da base da faixa “i”.

$tg\phi$: valor da tangente do ângulo de atrito interno do terreno no ponto médio da base da faixa “i”.

α_i : valor do ângulo que forma a reta que une o centro do círculo com o ponto médio da base da faixa “i” em relação à vertical.

W_i : soma do peso de todos os estratos de terreno que gravitam sobre o ponto médio da base da faixa “i”. Consideram-se as densidades aparentes ou submersas do terreno segundo estejam acima ou abaixo do NF.

Wh_i : peso da água localizada acima da superfície da faixa “i” se existisse NF.

Q_i : resultante da pressão que as sobrecargas atuantes produzem no terreno sobre o ponto médio da base da faixa “i”.

u_i : valor da sobrepressão de poros no ponto médio da base da faixa “i”. Este valor é nulo uma vez que o programa considera que a pressão de poros é igual ao valor da pressão hidrostática.

$M_{\tau M}$: momento produzido pela resistência ao esforço transversal do elemento de contenção em relação ao centro do círculo, quando este o atravessa.

$\sum MD_k$: soma dos “k” momentos das ações exteriores desequilibrantes em relação ao centro do círculo.

$\sum ME_m$: soma dos “m” momentos das ações exteriores equilibrantes em relação ao centro do círculo.

Como se comentou antes, a equação anterior é do tipo implícita em F, pelo que se resolve através de iterações sucessivas. Geralmente, a convergência a um valor final do coeficiente de segurança é rápida, não obstante, se o número de iterações alcançar o valor limite adotado em 50 iterações, o programa mostra uma mensagem na listagem de verificações. Alcança-se esse valor limite de iterações quando o sistema apresenta alguma situação particular que destabiliza a convergência ao equilíbrio (por exemplo densidades de terreno singulares, etc.).

As iterações terminam quando a diferença entre o valor do coeficiente de segurança calculado na iteração “j” e o calculado na iteração “j+1” é menor ou igual a 0.001 ($|F_j - F_{j+1}| \leq 0.001$).

2.3. Processo de cálculo

O procedimento utilizado pelo programa para a determinação do círculo cujo coeficiente de segurança é mínimo, consiste em definir uma primeira malha de pontos no plano da secção transversal em estudo, que serão os centros dos círculos que se analisarão. Esta primeira malha de centros cobre uma largura horizontal de 4 vezes a altura de contenção e uma altura na vertical de 2 vezes a altura de contenção. No caso do terreno possuir um degrau de altura relativamente a um talude no tardo, incrementa-se a altura da malha somando 2 vezes a altura desse degrau. O número de divisões de cada lado desta primeira malha é de 10.

Uma vez calculado o conjunto de círculos representativos em cada nó da malha, determina-se o ponto “P1” da mesma que possui o menor coeficiente de segurança. Depois define-se outra malha de menores dimensões, cujo centro é o mencionado no ponto “P1” e procede-se da mesma maneira, até obter para o ponto “P2” o coeficiente mínimo. Assim até alcançar o número de 3 malhas, ciclos ou aproximações, obtendo no final de todos os círculos propostos, o coeficiente de segurança mínimo de todos os calculados, cujo centro será o ponto “P3” da terceira iteração. As dimensões da 2ª e da 3ª malha são 0.40 vezes as dimensões da malha anterior, e o número de divisões de cada lado delas é de 6.

Em cada ponto da malha traçam-se círculos de raios crescentes, partindo de um raio mínimo tal que encastre no terreno 0.50 m até um raio máximo que resulta ser o maior de:

- raio mínimo + 2 metros.
- raio tal que alcance a cota do estrato mais profundo + 2 vezes a altura de contenção de terras.
- raio tal que alcance a cota do ponto mais profundo do elemento de contenção + altura de contenção de terras.

Não obstante, existe um controle que consiste em que uma vez que o valor do raio alcance a cota do estrato mais profundo que o utilizador tenha definido, e em 10 círculos consecutivos os seus coeficientes de segurança sejam de valor crescente, o programa não continua a aprofundar com mais círculos; caso contrário, continua a traçar círculos de maior raio até que se cumpra essa condição.

Antes de calcular o coeficiente de segurança do círculo que se propõe, realizam-se distintos controlos de validação do círculo. Isto é, descartam-se círculos que penetrem em rocha, que não contenham um desnível de terreno na sua superfície, que tenham tramos que não cortem terreno, que tenham o seu centro numa cota tal que intercelem com o terreno em pontos de cota superior à do centro.

Nas figuras seguintes mostram-se estes círculos que se descartam.

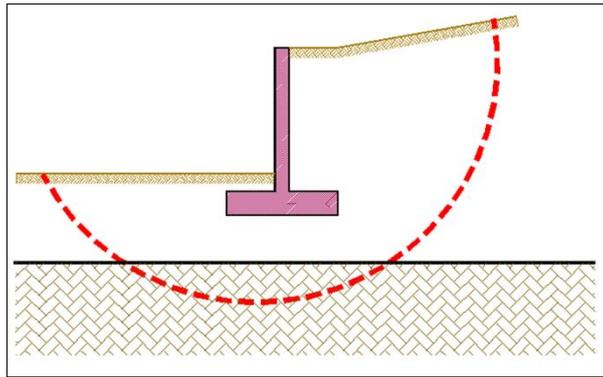


Fig. 2.1 Círculo não válido por penetrar numa manta rochosa.

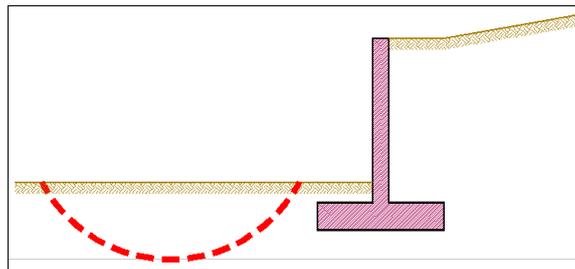


Fig. 2.2 Círculo não válido por não conter um desnível de terreno.

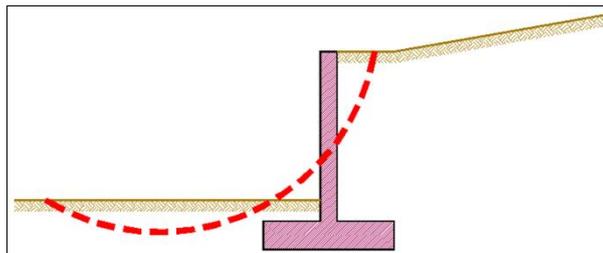


Fig. 2.3 Círculo não válido por ter um tramo que não corta o terreno.

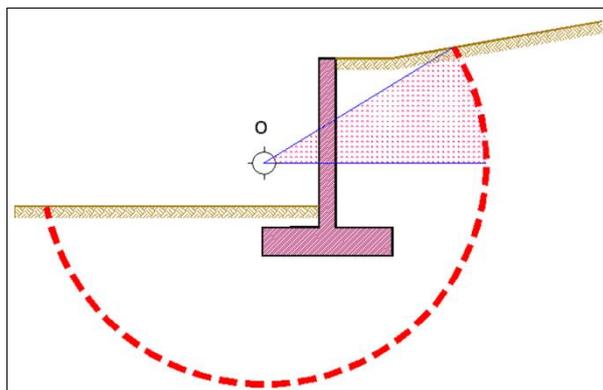


Fig. 2.4 Círculo não válido por ter no seu centro uma cota inferior a alguns pontos de interseção do círculo com o terreno.

3. Exemplo nº 1. StruBIM Cantilever Walls

3.1. Círculo de deslizamento desfavorável de um muro de contenção em consola

3.1.1. Dados do problema

Observe o muro da figura seguinte, pretende-se verificar o valor do coeficiente de segurança mínimo que se obteve através da utilização do programa **StruBIM Cantilever Walls**.

Utilizando o programa, obtém-se o valor do coeficiente de segurança mínimo $F = 1.696$ e o mapa de isovalores do coeficiente de segurança dos círculos de deslizamento propostos que se indicam na figura 3.2.

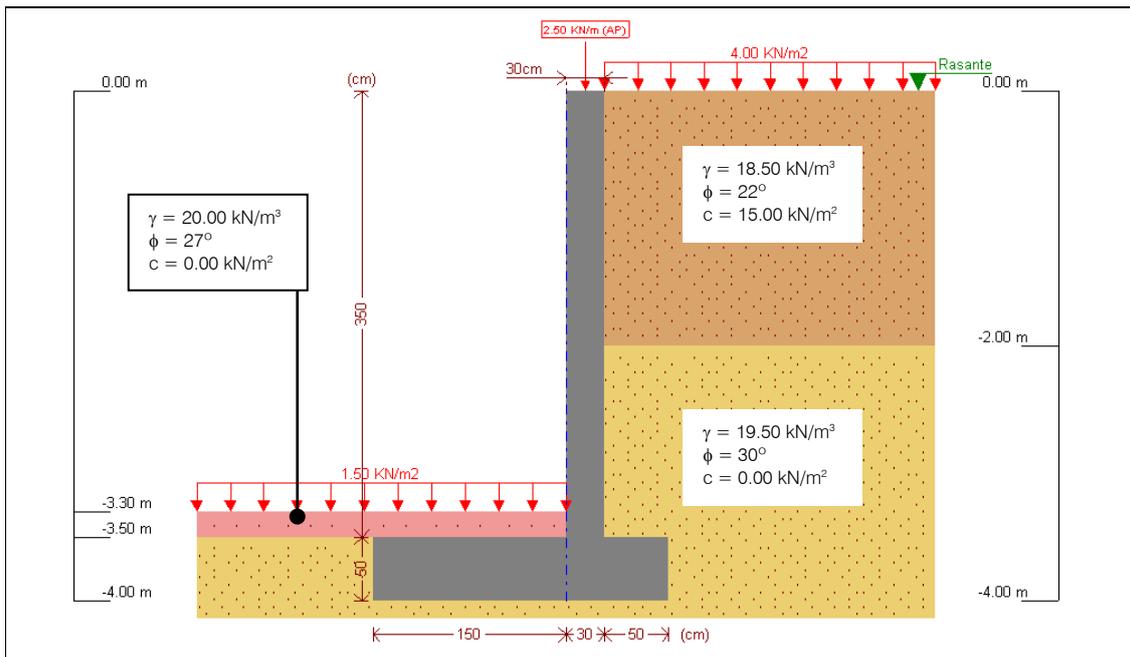


Fig. 3.1

3.1.2. Resultados do programa

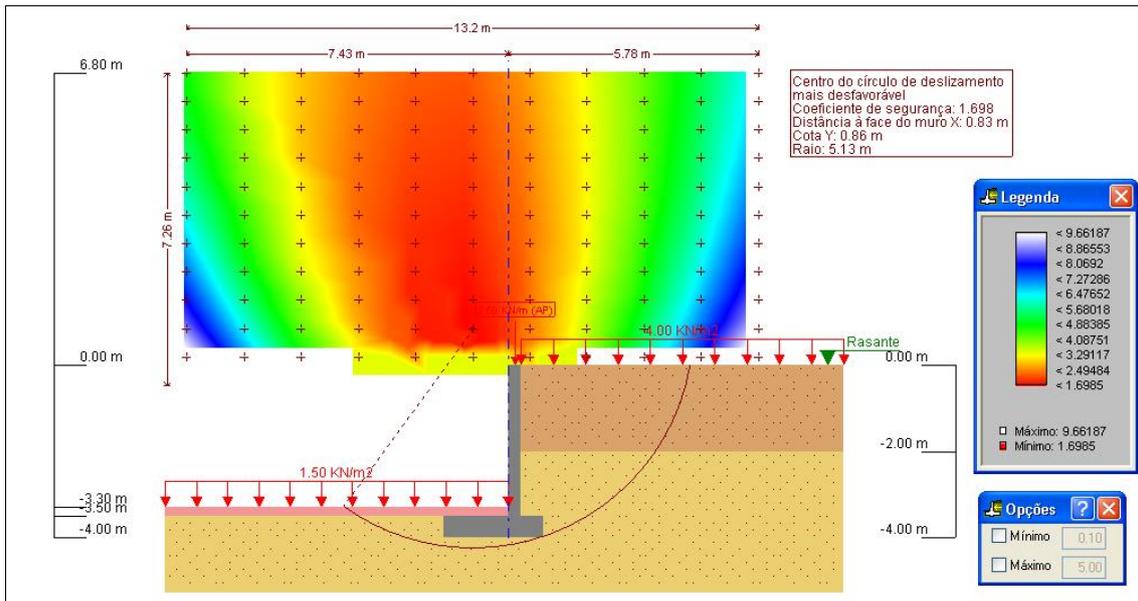


Fig. 3.2

Para desenvolver o problema, em primeiro lugar traça-se sobre o perfil do terreno, o círculo de deslizamento em questão. Depois, subdivide-se a massa deslizante através de faixas ou fatias como se mostra na figura 3.3.

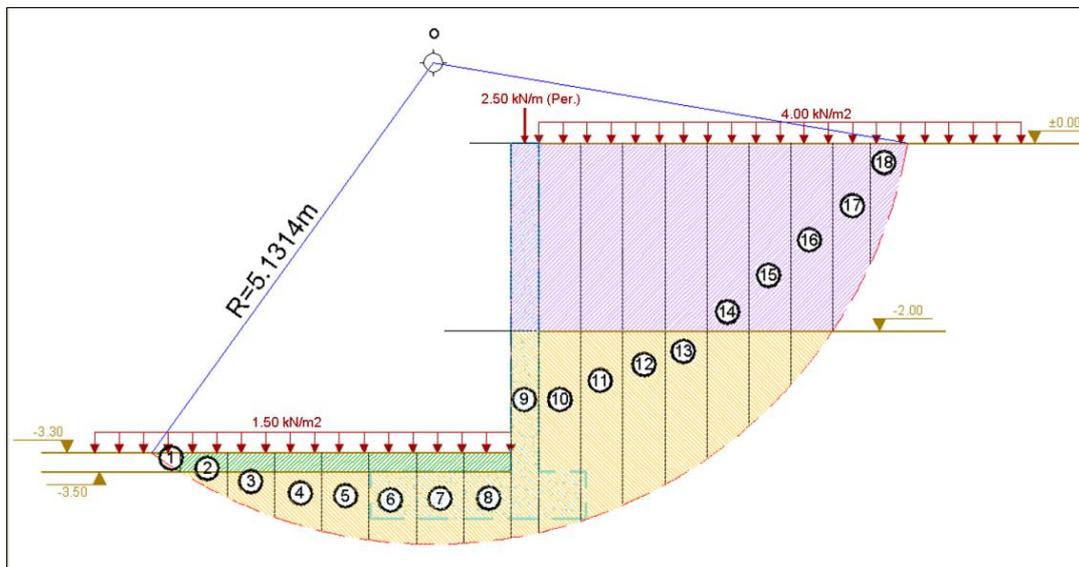


Fig. 3.3

3.1.3. Cálculo para comparar com os resultados do programa

O cálculo de comparação desenvolve-se através de uma folha de cálculo que permite levar a cabo processos iterativos para a determinação do coeficiente de segurança do círculo que se está a analisar.

Cálculo de momentos dos agentes distintos ao terreno:

Muro

$$\text{Área do muro (m)} = 2.30 \times 0.50 + 3.50 \times 0.30 = 2.20 \text{ m}^2$$

$$\text{Peso específico do muro } ^1 = 5.525 \text{ KN/m}^3$$

Coordenada X de centro de gravidade do muro = -0.11136 m

Momento do peso do muro = $2.20 \text{ m}^2 \times 5.525 \text{ kN/m}^3 \times (0.825 \text{ m} - 0.11136 \text{ m}) = 8.674 \text{ kN.m/m}$

¹ Calcula-se o peso específico do muro como 24,525 kN/m³ menos o peso específico médio ponderado do terreno na altura do muro. Isto faz-se porque como no estudo das faixas não se considera a existência do muro, só se deve calcular como efetiva a diferença de peso entre muro e solo.

Sobrecargas

- No tardoz

Comprimento de sobrecarga no tardoz dentro do círculo = $(4.23384 \text{ m} - 0.30 \text{ m}) = 3.9338 \text{ m}$

Resultante da sobrecarga de tardoz = $3.9338 \text{ m} \times 4.0 \text{ kN/m}^2 = 15.7354 \text{ kN/m}$

Momento da sobrecarga do tardoz = $(0.50 \times 3.9338 \text{ m} + 0.30 + 0.825 \text{ m}) \times 15.7354 \text{ kN/m} = 48.6526 \text{ kN.m/m}$

Momento das sobrecargas de tardoz / R = $48.6526 \text{ kN.m/m} / 5.1314 \text{ m} = 9.4814 \text{ kN.m/m}$

- Na face exterior

Comprimento de sobrecarga na face exterior dentro do círculo = 3.8293 m

Resultante da sobrecarga da face exterior = $3.8293 \text{ m} \times 1.5 \text{ kN/m}^2 = 5.744 \text{ kN/m}$

Momento da sobrecarga da face exterior = $(-0.50 \times 3.8293 \text{ m} + 0.825 \text{ m}) \times 5.744 \text{ kN/m} = -6.259 \text{ kN.m/m}$

Momento das sobrecargas de tardoz / R = $-6.259 \text{ kN.m/m} / 5.1314 \text{ m} = -1.2197 \text{ kN.m/m}$

Momento das sobrecargas / R = $(48.6526 \text{ kN.m/m} - 6.259 \text{ kN.m/m}) / 5.1314 \text{ m} = 8.2616 \text{ kN.m/m}$

Cargas no coroamento

Momento da carga vertical no coroamento = $2.5 \text{ kN/m} \times (0.825 \text{ m} + 0.15 \text{ m}) = 2.4375 \text{ kN.m/m}$

Momento da carga vertical no coroamento / R = $2.4375 \text{ kN.m/m} / 5.1314 \text{ m} = 0.475 \text{ kN.m/m}$

Na figura seguinte mostra-se a folha de cálculo utilizada para a verificação, na qual aparecem os dados das faixas e os valores acima calculados.

Conclusões

Como se pode verificar, o cálculo de comparação apresenta o mesmo valor do coeficiente de segurança para o círculo que o calculado com o programa, isto é:

$$F_s = 1.698$$

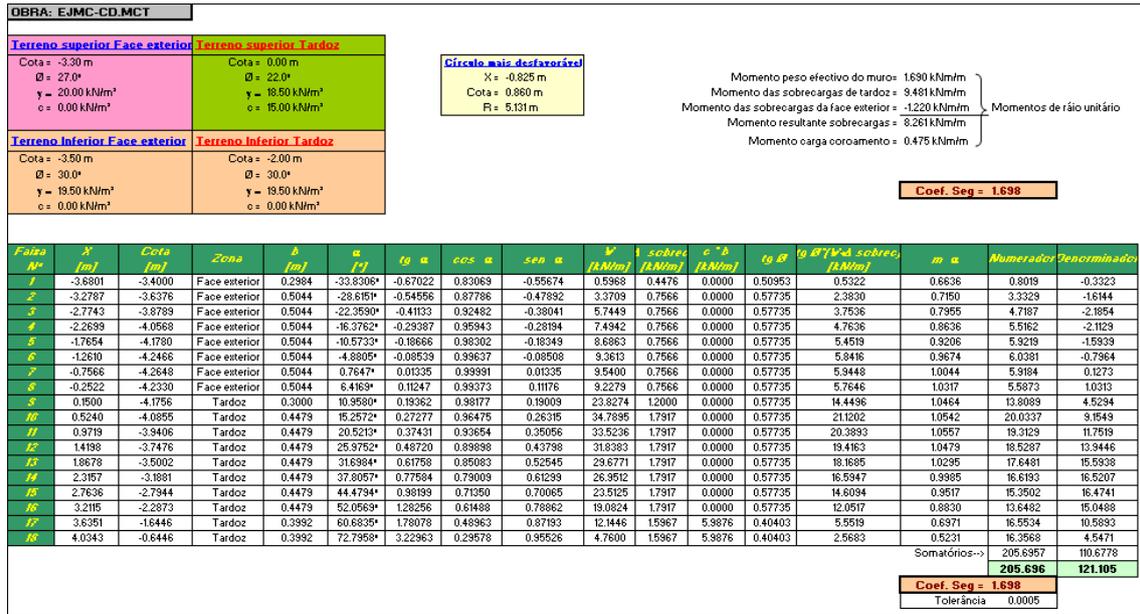


Fig. 3.4

4. Exemplo nº 2. StruBIM Embedded Walls

4.1. Círculo de deslizamento desfavorável numa fase qualquer de uma contenção periférica

4.1.1. Dados do problema

Observe a contenção periférica da figura seguinte, pretende-se verificar o valor do coeficiente de segurança mínimo que se obteve através da utilização do programa **StruBIM Embedded Walls**.

Utilizando o programa, obtém-se o valor do coeficiente de segurança mínimo $F = 3.727$ e o mapa de isovalores do coeficiente de segurança dos círculos de deslizamento propostos que se indicam na figura 4.2.

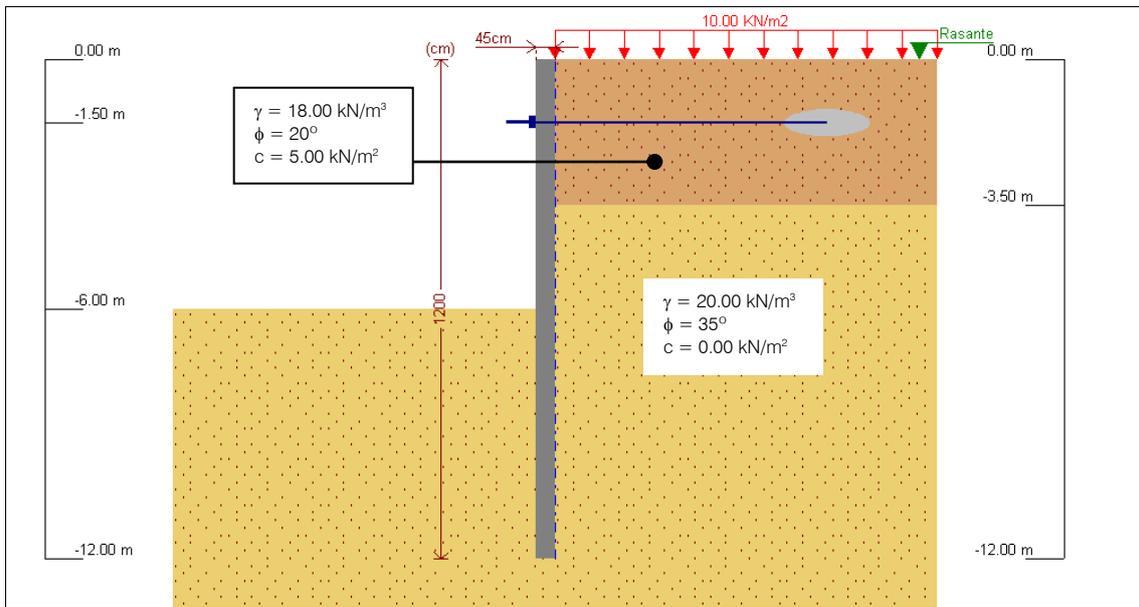


Fig. 4.1

4.1.2. Resultados do programa

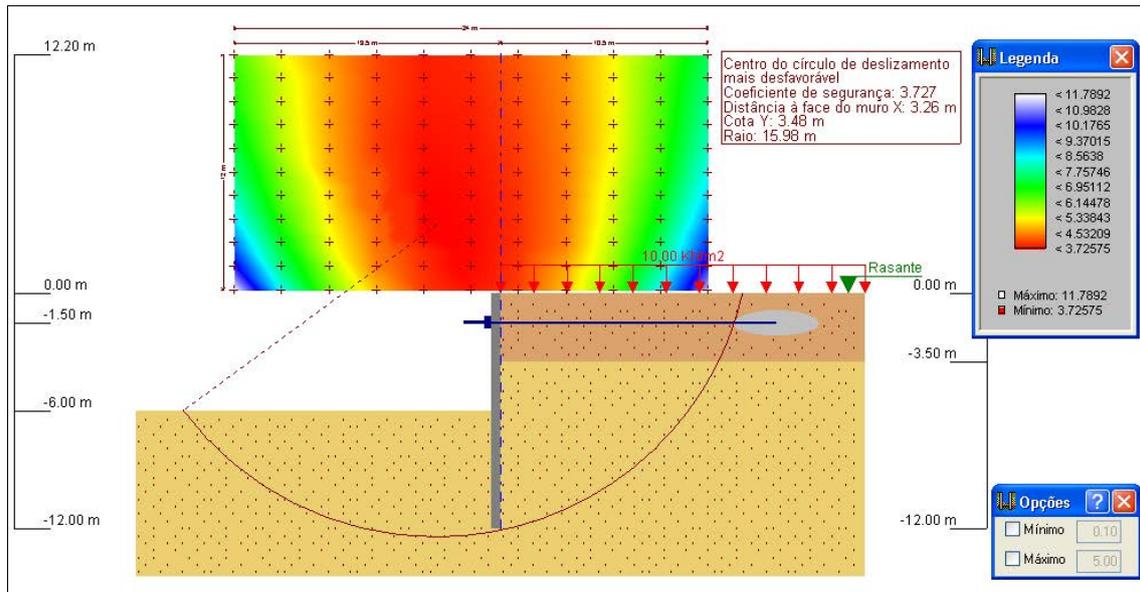


Fig. 4.2

Para desenvolver o problema, em primeiro lugar traça-se sobre o perfil do terreno, o círculo de deslizamento em questão. Depois, subdivide-se a massa deslizante através de faixas ou fatias como se mostra na figura 4.3.

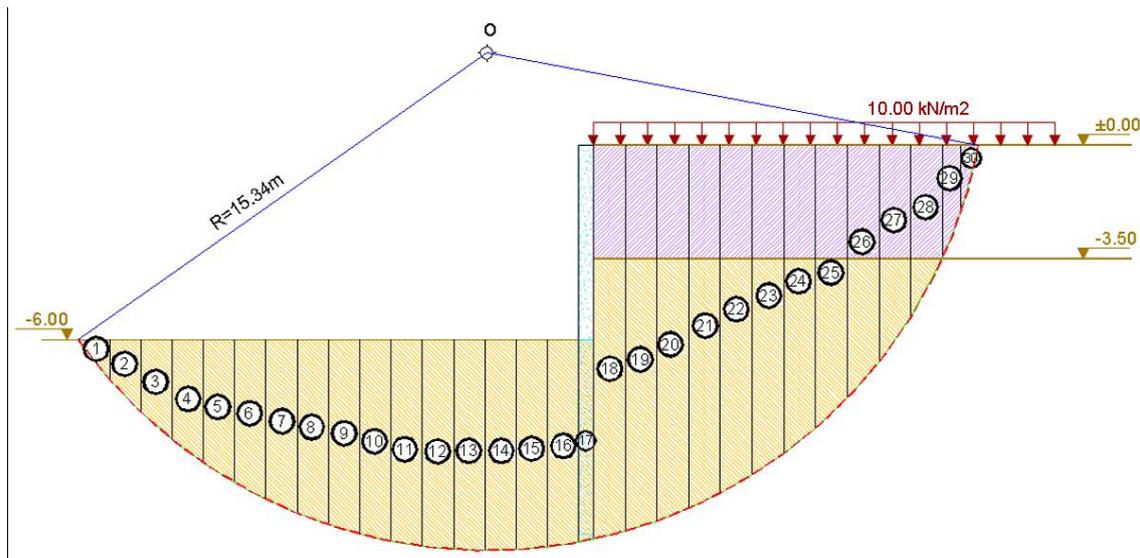


Fig. 4.3

4.1.3. Cálculo para comparar com os resultados do programa

Novamente, o cálculo de comparação desenvolve-se através de uma folha de cálculo que permite levar a cabo processos iterativos para o cálculo do coeficiente de segurança do círculo que se está a analisar.

Cálculo de momentos dos agentes distintos ao terreno:

Muro

$$\text{Área do muro} = (0,45 \times 12) \text{ m}^2 = 5,40 \text{ m}^2$$

$$\text{Peso específico do muro}^1 = 5,1083 \text{ kN/m}^3$$

Coordenada X de centro de gravidade do muro = -0.225 m

Momento do peso do muro = $5.40 \text{ m}^2 \times 5.1083 \text{ kN/m}^3 \times (3.26 \text{ m} - 0.225 \text{ m}) = 83.719 \text{ kN.m/m}$

¹ Calcula-se o peso específico do muro como 24,525 kN/m³ menos o peso específico médio ponderado do terreno na altura do muro. Isto faz-se porque como no estudo das faixas não se considera a existência do muro, só se deve calcular como efetiva a diferença de peso entre muro e solo.

Sobrecargas

- No tardoz

Comprimento de sobrecarga no tardoz dentro do círculo = 12.336 m

Resultante da sobrecarga de tardoz = $12.336 \text{ m} \times 10.0 \text{ kN/m}^2 = 123.36 \text{ kN/m}$

Momento da sobrecarga do tardoz = $(0.50 \times 12.336 \text{ m} + 3.26 \text{ m}) \times 123.36 \text{ kN/m} = 1163.04 \text{ kN.m/m}$

Momento das sobrecargas de tardoz / R = $1163.04 \text{ kN.m/m} / 15.98 \text{ m} = 72.781 \text{ kN.m/m}$

Na tabela seguinte mostra-se a folha de cálculo utilizada para a verificação, na qual aparecem os dados das faixas e os valores acima calculados.

Conclusões

Como se pode verificar, o cálculo de comparação apresenta o mesmo valor do coeficiente de segurança para o círculo que o calculado com o programa, isto é:

$$F_s = 3.727$$

OBRA EJMP-CD.MCT		Terreno superior Face este		Terreno superior Tardoz		Círculo de deslizamento desfavorável											
Cota = -10.000.00 m		Cota = 0.00 m		Cota = 0.00 m		X = -3.260 m											
Ø = 0.0*		Ø = 20.0*		Ø = 20.0*		Cota = 3.480 m											
γ = 0.00 kN/m ³		γ = 18.00 kN/m ³		γ = 18.00 kN/m ³		R = 15.980 m											
c = 0.00 kN/m ²		c = 5.00 kN/m ²		c = 5.00 kN/m ²													
Terreno inferior Face este		Terreno inferior Tardoz															
Cota = -6.00 m		Cota = -3.50 m															
Ø = 35.0*		Ø = 35.0*															
γ = 20.00 kN/m ³		γ = 20.00 kN/m ³															
c = 0.00 kN/m ²		c = 0.00 kN/m ²															
								Momento peso efetivo do muro = 5.239 kN/m									
								Momento das sobrecargas de tardoz = 72.781 kN/m									
								Momento das sobrecargas de face exterior = 0.000 kN/m									
								Momento resultante sobrecargas = 72.781 kN/m									
								Momento carga coroamento = 0.000 kN/m									
								Coef. Seg = 3.727									
Faixa	X [m]	Cota [m]	Zona	h [m]	α [°]	tg α	cos α	sen α	V [kN/m]	sobrec [kN/m]	c' [kN/m]	tg β	γ' [kN/m]	γ' sobrec [kN/m]	m α	Numero	Terminado
1	-15.3172	-6.6118	Face exterior	0.9592	-50.0708*	-1.19475	0.64184	-0.76684	11.7361	0.0000	0.0000	0.70021	8.2177	0.4978	16.5085	-8.9997	
2	-14.3580	-7.7272	Face exterior	0.9592	-44.7194*	-0.99025	0.71056	-0.70364	33.1343	0.0000	0.0000	0.70021	23.2009	0.5784	40.1136	-23.3145	
3	-13.3988	-8.6540	Face exterior	0.9592	-39.8813*	-0.83957	0.76737	-0.64120	50.9118	0.0000	0.0000	0.70021	35.6469	0.6469	55.1053	-32.6446	
4	-12.4397	-9.4356	Face exterior	0.9592	-35.4023*	-0.71074	0.81510	-0.57932	65.9070	0.0000	0.0000	0.70021	46.1486	0.7063	65.3413	-38.1814	
5	-11.4805	-10.0900	Face exterior	0.9592	-31.1900*	-0.60538	0.85545	-0.51788	78.8318	0.0000	0.0000	0.70021	55.0596	0.7582	72.6206	-40.7217	
6	-10.5213	-10.6616	Face exterior	0.9592	-27.1753*	-0.51347	0.88958	-0.45678	89.4248	0.0000	0.0000	0.70021	62.6159	0.8038	77.9024	-40.8471	
7	-9.5621	-11.1359	Face exterior	0.9592	-23.3251*	-0.43119	0.91827	-0.39595	98.5213	0.0000	0.0000	0.70021	68.9854	0.8439	81.7467	-39.0093	
8	-8.6030	-11.5203	Face exterior	0.9592	-19.8333*	-0.35595	0.94210	-0.33524	106.0906	0.0000	0.0000	0.70021	74.2854	0.8791	84.5016	-35.6766	
9	-7.6438	-11.8517	Face exterior	0.9592	-16.9568*	-0.28593	0.96147	-0.27491	112.2564	0.0000	0.0000	0.70021	78.6028	0.9098	86.3932	-30.8607	
10	-6.6846	-12.1047	Face exterior	0.9592	-12.3933*	-0.21974	0.97670	-0.21462	117.1098	0.0000	0.0000	0.70021	82.0012	0.9364	87.5726	-25.1343	
11	-5.7255	-12.2928	Face exterior	0.9592	-8.8841*	-0.15631	0.98800	-0.15444	120.7169	0.0000	0.0000	0.70021	84.5269	0.9590	88.1414	-18.6430	
12	-4.7663	-12.4183	Face exterior	0.9592	-5.4124*	-0.09475	0.99554	-0.09432	123.1240	0.0000	0.0000	0.70021	86.2124	0.9778	88.1677	-11.6134	
13	-3.8071	-12.4827	Face exterior	0.9592	-1.9630*	-0.03427	0.99941	-0.03425	124.3607	0.0000	0.0000	0.70021	87.0783	0.9930	87.6941	-4.2599	
14	-2.8479	-12.4870	Face exterior	0.9592	1.4783*	0.02581	0.99967	0.02580	124.4419	0.0000	0.0000	0.70021	87.1352	1.0045	86.7436	3.2104	
15	-1.8888	-12.4310	Face exterior	0.9592	4.9256*	0.08618	0.99631	0.08586	123.3685	0.0000	0.0000	0.70021	86.3835	1.0124	85.3224	10.5927	
16	-0.9296	-12.3142	Face exterior	0.9592	8.3933*	0.14795	0.98929	0.14597	121.1276	0.0000	0.0000	0.70021	84.8145	1.0167	83.4205	17.6807	
17	-0.2250	-12.1950	Face exterior	0.4500	10.9580*	0.19362	0.98177	0.19009	55.7552	0.0000	0.0000	0.70021	39.0402	1.0175	38.3696	10.5985	
18	0.4868	-12.0269	Tardoz	0.9735	13.5834*	0.24162	0.97203	0.23486	227.3504	0.9735	0.0000	0.70021	159.8742	1.0161	157.3334	53.3955	
19	1.4603	-11.7467	Tardoz	0.9735	17.2233*	0.31000	0.95516	0.29610	221.8953	0.9735	0.0000	0.70021	156.0544	1.0108	154.3899	65.7025	
20	2.4338	-11.3945	Tardoz	0.9735	20.9461*	0.38279	0.93392	0.35749	215.0377	0.9735	0.0000	0.70021	151.2527	1.0011	151.0905	76.8738	
21	3.4073	-10.9647	Tardoz	0.9735	24.7766*	0.46167	0.90795	0.41908	206.6698	0.9735	0.0000	0.70021	145.3934	0.9867	147.3569	86.6115	
22	4.3808	-10.4498	Tardoz	0.9735	28.7456*	0.54852	0.87676	0.48092	196.6439	0.9735	0.0000	0.70021	138.3732	0.9671	143.0795	94.5703	
23	5.3543	-9.8393	Tardoz	0.9735	32.8929*	0.64675	0.83969	0.54307	184.7565	0.9735	0.0000	0.70021	130.0496	0.9417	138.1000	100.3357	
24	6.3278	-9.1183	Tardoz	0.9735	37.2725*	0.76104	0.79576	0.60561	170.7194	0.9735	0.0000	0.70021	120.2207	0.9095	132.1788	103.3887	
25	7.3013	-8.2651	Tardoz	0.9735	41.9620*	0.89920	0.74399	0.66864	154.1080	0.9735	0.0000	0.70021	108.5892	0.8692	124.9308	103.0425	
26	8.2748	-7.2455	Tardoz	0.9735	47.0820*	1.07545	0.68095	0.73233	134.2561	0.9735	0.0000	0.70021	94.6888	0.8185	115.6826	98.3197	
27	9.2483	-6.0001	Tardoz	0.9735	52.8413*	1.31943	0.60402	0.79697	110.0076	0.9735	0.0000	0.70021	77.7098	0.7537	103.0992	87.6723	
28	10.2218	-4.4057	Tardoz	0.9735	59.6760*	1.70965	0.50489	0.86318	78.3644	0.9735	0.0000	0.70021	55.9731	0.6670	83.9124	68.1608	
29	10.9851	-2.8017	Tardoz	0.5531	66.2039*	2.26773	0.40348	0.91499	27.8948	0.5531	2.7657	0.36397	10.3542	0.4928	26.6216	25.5234	
30	11.5382	-1.0517	Tardoz	0.5531	72.3738*	3.26552	0.29281	0.95617	10.4709	0.5531	2.7657	0.36397	4.0124	0.3862	17.9519	10.0120	
Somatórios-->																2720.9925	685.8847
Coef. Seg = 3.658																2720.992	743.905
Tolerância																0.0637	

Fig. 4.4