

5

Análises de probabilidade de deslizamento de muro de arrimo

5.1.

Introdução

Apresentam-se, a seguir, aplicações de métodos probabilísticos em estimativas de probabilidades de deslizamento de um muro de arrimo, cujas características são reportadas por Duncan (1999). Tais aplicações são incrementadas com variações do nível d'água no terrapleno.

No final do capítulo é feita uma análise dos resultados e uma sugestão para dimensionamento de muros de arrimo com base em probabilidades de deslizamento admissíveis.

5.2.

Aplicação do Método do Segundo Momento para a estimativa de probabilidade de deslizamento de um muro de arrimo

Duncan (1999) analisou a estabilidade referente ao deslizamento do muro de arrimo descrito na figura 5.1. Os valores de média e desvio padrão do peso específico do concreto, do peso específico do terrapleno, do ângulo de atrito efetivo e da tangente do ângulo de atrito entre a base do muro e a areia são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1. Valores de média e desvio padrão dos parâmetros para análise de estabilidade, Duncan (1999)

Parâmetro	Valor médio	Desvio Padrão
Peso específico do concreto (kN/m ³)	23,55	0,314
Peso específico do terrapleno (kN/m ³)	18,84	1,099
Ângulo de atrito efetivo (°)	30,1	3,92
Tangente do ângulo de atrito solo/muro	0,5	0,05

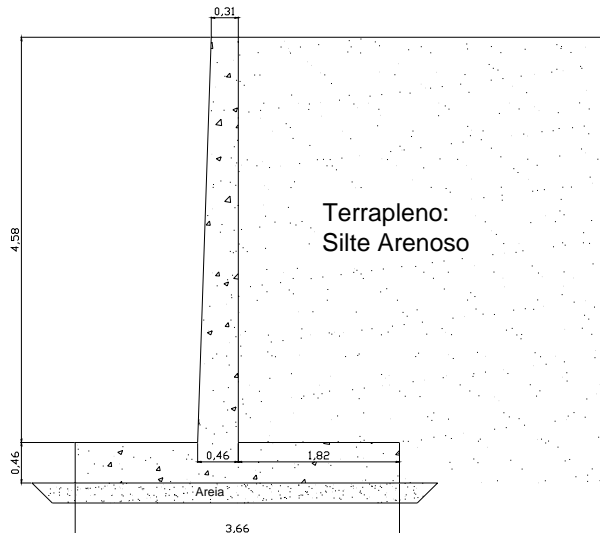


Figura 5.1. Esquema do muro de arrimo (dimensões em m), Duncan (1999)

O fator de segurança referente ao deslizamento do muro é o seguinte:

$$FS = \frac{\sum W \cdot \text{tg} \delta}{\sum E} \quad [5.1]$$

onde:

W = peso

δ = ângulo de atrito solo/muro

E = empuxo

O empuxo, no caso ativo, é resultante de um diagrama de tensões efetivas horizontais, que pode ser obtido através da teoria de Rankine (1857), cujas hipóteses são: o critério de ruptura é o de Mohr-Coulomb, o tardo do muro é vertical, não existe atrito ou aderência entre o terrapleno e o tardo do muro, o solo é homogêneo e isotrópico e a massa do terrapleno está toda em estado limite de equilíbrio. Através da equação 5.2 são obtidas as tensões efetivas horizontais de Rankine (1857), no caso ativo.

$$\sigma'_H = \sigma'_V K_a - 2c' \sqrt{K_a} \quad [5.2]$$

onde: K_a = coeficiente de empuxo ativo = $\text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right)$

O diagrama de tensões efetivas horizontais pode ser também obtido pela teoria de Coulomb (1776), que admite o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, com uma cunha de ruptura formada por um corpo rígido de solo homogêneo e isotrópico, com superfície de ruptura plana. Coulomb (1776) considera a existência de atrito e eventual adesão entre o terrapleno e o tardoz.

Para uma configuração de terrapleno composto de solo não coesivo sem sobrecarga, tem-se o coeficiente de empuxo ativo, de acordo com Coulomb (1776), mostrado na equação 5.3. Neste caso particular, para tardoz com inclinação nula, as tensões efetivas horizontais são estimadas com base na equação 5.4.

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(\alpha + \phi')}{\text{sen}^2 \alpha \cdot \text{sen}(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi' + \delta) \cdot \text{sen}(\phi' - \beta)}{\text{sen}(\alpha - \delta) \cdot \text{sen}(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad [5.3]$$

onde: α = ângulo de inclinação do tardoz, δ = ângulo de atrito entre o terrapleno e o tardoz e β = ângulo de inclinação do terrapleno

$$\sigma'_H = \sigma'_v K_a \cdot \cos \delta \quad [5.4]$$

Utilizando a teoria de Rankine (1857) para o cálculo do empuxo ativo atuante no muro, tem-se um fator de segurança determinístico igual a 1,5. Tal valor corresponde à situação de terrapleno com ausência de nível d'água. De acordo com a teoria de Coulomb (1776), com o ângulo de atrito entre solo e tardoz igual ao ângulo de atrito efetivo do solo do terrapleno, tem-se um valor esperado de 1,94 para FS.

A figura 5.2 mostra os diagramas de tensões efetivas atuantes no muro, de acordo com as teorias de Rankine (1857) e Coulomb (1776).

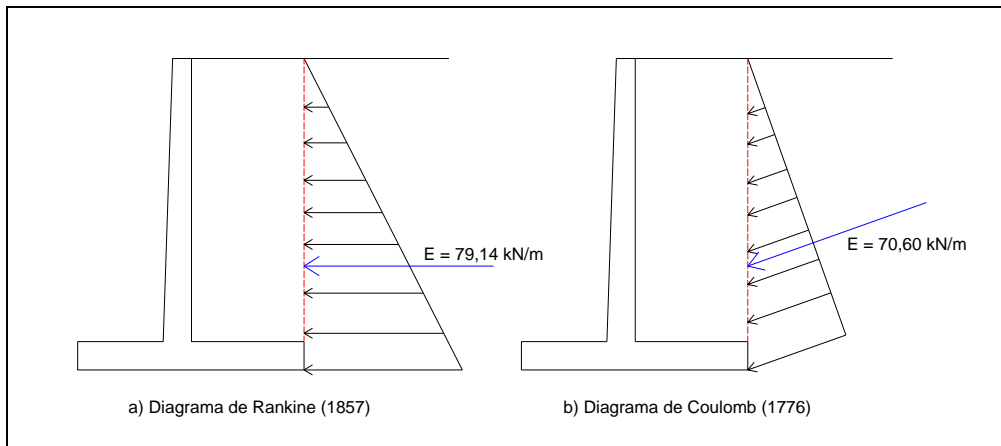


Figura 5.2. Diagramas de tensões efetivas atuantes no muro

A variância de FS, de acordo com o Método do Segundo Momento de Primeira Ordem, é obtida por meio da seguinte equação:

$$V[FS] = \left[\frac{\partial FS}{\partial \phi'} \right]^2 \cdot V[\phi'] + \left[\frac{\partial FS}{\partial \gamma_c} \right]^2 \cdot V[\gamma_c] + \left[\frac{\partial FS}{\partial \gamma_{nat}} \right]^2 \cdot V[\gamma_{nat}] + \left[\frac{\partial FS}{\partial \delta} \right]^2 \cdot V[\delta] \quad [5.5]$$

A tabela 5.2 mostra o cálculo da variância de FS, com empuxos estimados pela teoria de Rankine (1857), utilizando-se o método das diferenças divididas para o cálculo das derivadas parciais. Com base nos empuxos estimados segundo a teoria de Coulomb (1776), tem-se a variância de FS mostrada na tabela 5.3.

Tabela 5.2. Cálculo da variância de FS, referente ao deslizamento do muro, com empuxos calculados pela teoria de Rankine (1857)

Parâmetros x_i	Média	Desvio Padrão	Variância	Varição Δx_i	Varição de FS _i	$\Delta FS / \Delta x_i$	$(\Delta FS / \Delta x_i)^2 \cdot V[x_i]$	% de Influência
ϕ' (°)	30,1	3,92	15,332	0,01	0,001	0,061	0,0562	70,6
γ_t (kN/m ³)	18,84	1,099	1,208	0,3	-0,008	-0,027	0,0009	1,1
$\gamma_{concreto}$ (kN/m ³)	23,55	0,314	0,099	1,0	0,022	0,022	0,0000	0,1
$tg\delta$	0,5	0,050	0,003	1,0	3,000	3,000	0,0225	28,3
						Σ	0,0796	100,0

Tabela 5.3. Cálculo da variância de FS, referente ao deslizamento do muro, com empuxos calculados pela teoria de Coulomb (1776)

Parâmetros x_i	Média	Desvio Padrão	Variância	Varição Δx_i	Varição de FS _i	$\Delta FS_i/\Delta x_i$	$(\Delta FS_i/\Delta x_i)^2 \cdot V[x_i]$	% de Influência
ϕ (°)	30,1	3,92	15,332	0,2	-0,0177	-0,088	0,1196	75,28
γ_t (kN/m ³)	18,84	1,099	1,208	0,2	0,007	0,035	0,0014	0,91
γ_{concreto} (kN/m ³)	23,55	0,314	0,099	1	-0,028	-0,028	0,0001	0,05
tg δ	0,5	0,050	0,003	1	-3,887	-3,887	0,0378	23,76
						Σ	0,1589	100,0

Adotando-se uma distribuição normal para o fator de segurança, têm-se para as teorias de Rankine e Coulomb, respectivamente, probabilidades de deslizamento iguais a 3,863% (1:26) e 0,905% (1:110).

Desenvolvendo-se os cálculos de média e variância de FS, mostrados no Apêndice 3, para várias posições de nível d'água no terrapleno, são obtidas as probabilidades de deslizamento mostradas na tabela 5.4, com os empuxos de Rankine e Coulomb. Neste caso, um diagrama de empuxo gerado pela água é adicionado para cada posição de N.A. A representação gráfica desses resultados encontra-se ilustrada na figura 5.3.

Tabela 5.4. Variação da probabilidade de deslizamento com a profundidade do nível d'água em relação à superfície do terrapleno – Método do Segundo Momento

Profundidade do N.A. (m)	Probabilidade de Deslizamento (%) - Teoria de Rankine	Probabilidade de Deslizamento (%) - Teoria de Coulomb
5	3,863	0,905
4,5	4,034	0,909
4	4,598	0,943
3,5	5,882	1,082
3	8,719	1,52
2,5	15,146	2,876
2	29,405	7,457
1,5	55,627	22,72
1	85,044	58,099
0,5	98,415	91,971
0	99,973	99,759

Examinando o gráfico da figura 5.3 verifica-se que, com empuxos de Rankine, para profundidades de nível d'água entre 0 e 1,6m, têm-se probabilidades de deslizamento superiores a 50%, indicando condição crítica (correspondente a valores de FS menores que 1). Para empuxos de Coulomb, a condição crítica ocorre para níveis d'água entre 0 e 1,2m.

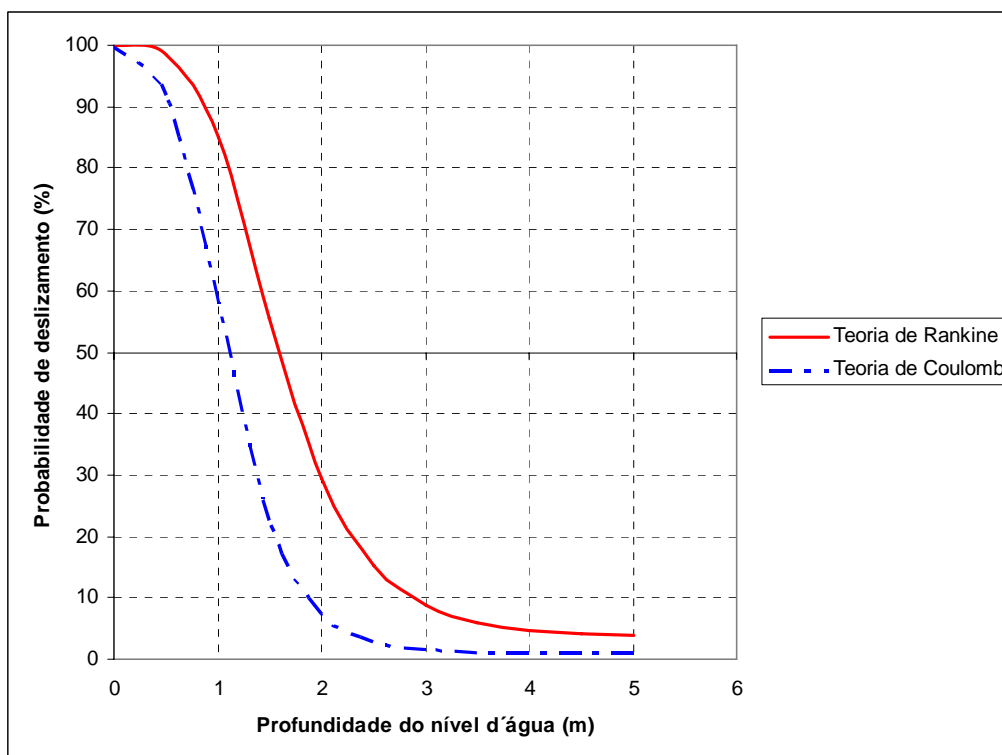


Figura 5.3. Gráfico de variação da probabilidade de ruptura com a profundidade do nível d'água no terrapleno

5.3.

Aplicação do Método das Estimativas Pontuais para a estimativa de probabilidade de deslizamento de um muro de arrimo

Para o desenvolvimento do Método das Estimativas Pontuais são necessárias, nesta análise de probabilidade de deslizamento, dezesseis análises determinísticas para cada teoria de cálculo de empuxo, utilizando-se os quatro parâmetros (γ_t , γ_{concreto} , ϕ' e $\text{tg}\delta$), acrescidos ou decrescidos de seus respectivos valores de desvio-padrão. A tabela 5.5 mostra os fatores de segurança correspondentes às dezesseis análises, calculados com base nas teorias de Rankine e Coulomb, com o nível d'água a uma profundidade de 5m em relação à superfície do terrapleno.

Os valores de média e variância de FS, de acordo com os empuxos estimados pela teoria de Rankine, são respectivamente, iguais a 1,525 e 0,082. Para fatores de segurança calculados a partir dos empuxos de Coulomb são obtidos, média e variância, iguais a 1,980 e 0,163. As variâncias são determinadas com base na equação 5.6.

$$V[FS] = \frac{\sum_{i=1}^{16} FS_i^2}{16} - E[FS]^2 \quad [5.6]$$

Tabela 5.5. Resultados das análises determinísticas para o Método das Estimativas Pontuais

Combinação	Valores dos Parâmetros				FS Teoria de Rankine	FS Teoria de Coulomb
	γ_t (kN/m ³)	ϕ'	$\text{tg}\delta$	γ_{concreto} (kN/m ³)		
1	19,939	34,036	0,55	23,864	1,91	2,52
2	17,741	34,036	0,55	23,864	1,99	2,62
3	19,939	26,204	0,55	23,864	1,39	1,77
4	19,939	34,036	0,45	23,864	1,56	2,06
5	19,939	34,036	0,55	23,236	1,89	2,50
6	17,741	26,204	0,45	23,236	1,17	1,49
7	17,741	26,204	0,55	23,864	1,45	1,84
8	19,939	34,036	0,45	23,236	1,55	2,04
9	17,741	26,204	0,45	23,864	1,19	1,51
10	19,939	26,204	0,45	23,236	1,13	1,43
11	17,741	34,036	0,45	23,236	1,61	2,13
12	17,741	26,204	0,55	23,236	1,44	1,82
13	19,939	26,204	0,55	23,236	1,38	1,75
14	17,741	34,036	0,55	23,236	1,97	2,60
15	19,939	26,204	0,45	23,864	1,14	1,45
16	17,741	34,036	0,45	23,864	1,63	2,15

Admitindo-se uma distribuição normal para FS, têm-se probabilidades de deslizamento iguais a 3,379% e 0,764%, respectivamente para empuxos calculados a partir das teorias de Rankine e Coulomb. Desenvolvendo-se o Método das Estimativas Pontuais para várias posições de nível d'água no terrapleno, com os cálculos apresentados no Apêndice 3, são obtidas as probabilidades de deslizamento apresentadas na tabela 5.6.

Tabela 5.6. Variação da probabilidade de deslizamento com a profundidade do nível d'água em relação à superfície do terrapleno – Método das Estimativas Pontuais

Profundidade do N.A. (m)	Probabilidade de Deslizamento (%) (Teoria de Rankine)	Probabilidade de Deslizamento (%) (Teoria de Coulomb)
5	3,379	0,764
4,5	3,542	0,772
4	4,083	0,815
3,5	5,319	0,961
3	8,077	1,400
2,5	14,415	2,753
2	28,689	7,370
1,5	55,215	22,850
1	85,012	58,549
0,5	98,437	92,201
0	99,974	99,771

5.4.

Análises dos resultados e sugestão para dimensionamento de muro de arrimo com base em uma probabilidade de deslizamento admissível

5.4.1.

Análise dos resultados

As probabilidades de deslizamento obtidas pelos dois métodos probabilísticos são muito próximas. De acordo com os resultados da análise de variação da probabilidade de deslizamento com a profundidade do nível d'água no terrapleno, verifica-se que há um sensível aumento de $P[FS \leq 1]$ com a variação do N.A. entre as profundidades de 3m e 1m.

As probabilidades de deslizamento determinadas com fatores de segurança previstos a partir de empuxos horizontais de Rankine são significativamente maiores que as probabilidades obtidas com a utilização da teoria de Coulomb, para profundidades de nível d'água superiores a 1,0m. Negligenciando-se o ângulo de atrito na interface vertical entre o solo da cunha de movimentação e o solo apoiado na sapata do muro, hipótese de Rankine, há um aumento de

aproximadamente quatro vezes na probabilidade de deslizamento, com o nível d'água a uma profundidade de 5m em relação à superfície do terrapleno.

De uma forma geral, de acordo com o método do Segundo Momento, a variância do ângulo de atrito efetivo teve influência significativa na variância de FS.

5.4.2.

Sugestão para dimensionamento de muro de arrimo com base em uma probabilidade de deslizamento admissível

Admitindo-se ausência do nível d'água no terrapleno, conseguida com um sistema adequado de drenagem, é gerada a tabela 5.7 com base no Método do Segundo Momento de Primeira Ordem e em empuxos estimados através da teoria de Rankine. Tal tabela mostra a variação da probabilidade de deslizamento com a largura (B) da base do muro. A ilustração gráfica dessa tabela é mostrada na figura 5.4, com uma curva de regressão quadrática representada pela equação 5.7. Para esta análise, os cálculos de média e variância são mostrados no Apêndice 4.

$$B = 0,344.P[FS \leq 1]^2 - 3,0046.P[FS \leq 1] + 10,285 \quad [5.7]$$

onde: B é a largura da base do muro e $P[FS \leq 1]$ é a probabilidade de deslizamento

A equação 5.7 permite dimensionar-se a base do muro segundo uma probabilidade de deslizamento admissível. Tal probabilidade pode ser obtida a partir do gráfico de Whitman (1984), apresentado na figura 2.8. Por exemplo, se em consequência do deslizamento do muro existe um possível custo de US\$ 1.000.000,00 para reparos e indenizações, a probabilidade de deslizamento ou ruptura admissível é de aproximadamente 3%, que segundo a equação 5.7 resulta em uma dimensão de 4,37m para a base do muro.

Tabela 5.7. Variação da probabilidade de deslizamento com a largura da base do muro

Largura da Base (m)	Probabilidade de Deslizamento (%)
4	3,437
4,5	2,901
5	2,456
5,5	2,085
6	1,775
6,5	1,516
7	1,299

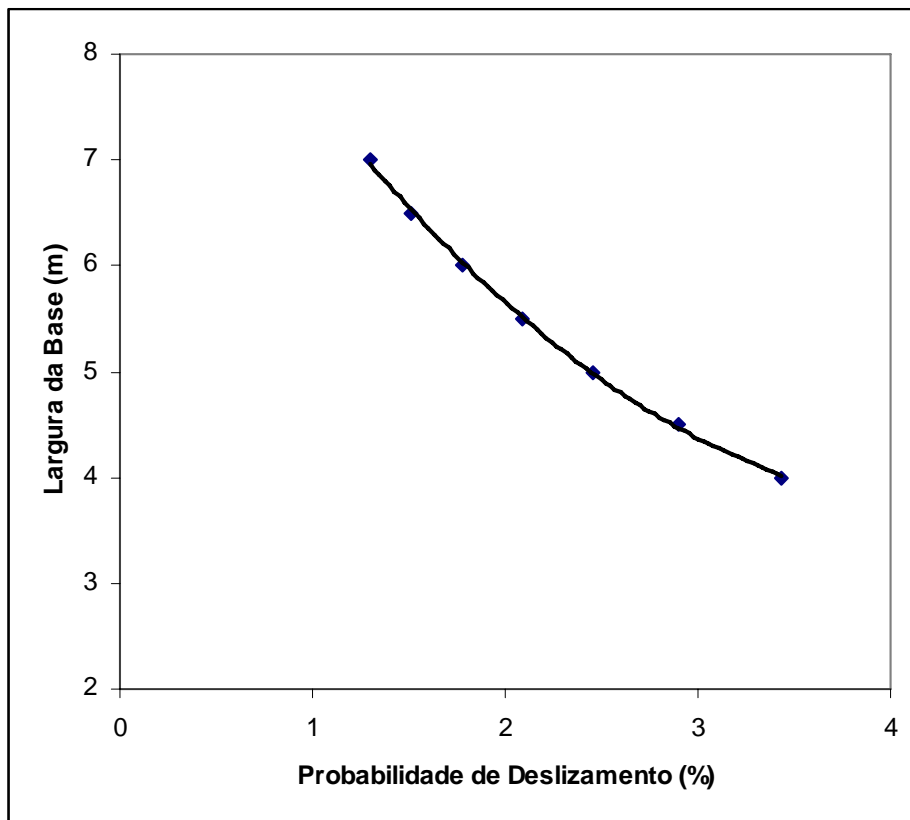


Figura 5.4. Gráfico de variação da probabilidade de deslizamento com a largura da base do muro