

Estruturas em Solo Reforçado e os Métodos de Dimensionamento por Equilíbrio Limite

André Estevão Ferreira da Silva
Huesker Ltda, S. José dos Campos, SP

Delma Vidal
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Geotecnia, S. José dos Campos, SP

RESUMO: No dimensionamento de estruturas de solo reforçado, alguns métodos que consideram cunha de ruptura plana são consagrados e utilizados correntemente no cálculo de projetos dessa natureza. Por se basearem em hipóteses muitas vezes simplificadoras, são métodos de aplicação limitada. No entanto, nem sempre seus limites de aplicabilidade são respeitados. Este trabalho discute, através de análises paramétricas, os limites de validade de três dos métodos de dimensionamento que consideram superfícies planas de ruptura: Coulomb, Rankine e Dois Blocos.

PALAVRAS CHAVE: Reforço, Estruturas de solo reforçado, Métodos de dimensionamento.

1 INTRODUÇÃO

No dimensionamento de estruturas de solo reforçado, principalmente em se tratando de cálculos preliminares, é bastante comum a utilização de métodos de análise que consideram hipóteses simplificadoras.

Um dos fatores a ser considerado na análise é a configuração geométrica da cunha crítica de ruptura. Com o propósito de tornar mais simples a análise, é comum se lançar mão de propostas que consideram a cunha de ruptura como uma superfície plana. Em muitos casos, esta é uma hipótese correta ou, pelo menos, bastante próxima da situação real; em outros, no entanto, esta consideração não tem qualquer fundamento teórico ou algébrico, e pode levar a conclusões errôneas quanto às condições de estabilidade da estrutura.

Além da configuração da cunha, outras considerações são importantes na análise: efeitos das sobrecargas previstas, parâmetros de resistência do solo de aterro (atrito e coesão), geometria da estrutura (altura e inclinação do talude). Para qualquer proposta utilizada, estes são parâmetros de entrada da análise.

É importante notar que os vários métodos de cálculo foram todos desenvolvidos baseados em determinadas considerações assumidas para cada um desses fatores e, por isso, principalmente os mais simples, apresentam certas limitações com relação à aplicabilidade de cada uma. Neste sentido pode-se chegar a

situações em que determinados métodos nem mesmo são válidos para a análise do problema. Ainda assim, em muitas dessas situações, é comum o uso de métodos e a consideração de hipóteses equivocadamente.

Com o propósito de levantar alguns dos equívocos mais comumente praticados, desenvolveu-se, como objeto de trabalho de graduação no ITA (Silva, 1998), uma análise paramétrica enfatizando alguns desses fatores intervenientes no cálculo de estruturas de solo reforçado. Esta análise foi feita através da comparação de três dos métodos mais utilizados no dimensionamento de estruturas dessa natureza, e que consideram cunha de ruptura plana: o método de Rankine e o de Coulomb que consideram cunha de ruptura linear e o método dos Dois Blocos que considera cunha bi-linear.

Para tanto, utilizou-se como ferramenta um “software” de dimensionamento de estruturas de solo reforçado produzido como objeto do mesmo trabalho, o programa SoloRef. Esta análise comparativa é interessante na medida em que torna possível perceber o quanto os resultados dos cálculos são sensíveis às hipóteses e aos métodos de dimensionamento adotados.

Este trabalho objetiva mostrar a importância do uso adequado das propostas de dimensionamento mais frequentemente adotadas na análise de um projeto dessa natureza.

2 ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO

Uma estrutura de solo reforçado é constituída por um sistema que considera a inserção de elementos de reforço no corpo do maciço de solo compactado. Estruturas de solo reforçado, uma alternativa para soluções como muro de gravidade e de flexão, são utilizadas cada vez em mais larga escala com, basicamente, duas finalidades: contenção de encostas e aterros de base para obras de infra-estrutura (bastante comum em rodovias). Várias são as propostas para a constituição destes reforços. No presente trabalho, estamos discutindo a utilização de geossintéticos como elementos planos de reforço.

Quando o aterro não apresenta estabilidade contando-se apenas com a resistência ao cisalhamento do solo, é necessário reforçar a estrutura. Neste caso, deve-se dimensionar esta estrutura com relação ao sistema de reforços. O estudo de uma estrutura de solo reforçado consiste na análise de três aspectos: estabilidade interna, externa e local.

A análise da estabilidade interna considera, como o próprio termo sugere, a integridade interna da estrutura, os riscos de colapso por uma possível falta de resistência ao peso próprio e a outras eventuais solicitações. A análise da estabilidade interna consiste no dimensionamento propriamente dito, uma vez que é através desta que se determinam as necessidades de reforço da estrutura, no que se refere às forças resistentes de estabilização que o mesmo deve prover à estrutura.

A análise da estabilidade externa é importante para se verificar a viabilidade da obra. Uma vez dimensionada a estrutura, deve-se verificar se não há risco de ruptura global ou outro mecanismo de colapso devido às solicitações externas a ela e às condições do solo de fundação da mesma, analisando os fatores de segurança ao tombamento, ao deslizamento e à capacidade de carga do solo de base. Caso um destes fatores não seja satisfatório, pode ser necessário aumentar a base da estrutura reforçada ou adotar um outro procedimento que aumente o fator de segurança.

A análise da estabilidade local é a verificação dos riscos de erosão ou ruptura localizada, principalmente em muros com face em blocos, que podem sofrer movimentações, causando danos estéticos ou queda dos blocos. Neste caso deve-se considerar o atrito entre blocos

(analisando os riscos de tombamento e deslizamento dos blocos), a resistência ao arrancamento do reforço ancorado no bloco e a resistência do bloco ao carregamento normal. Quando não for o caso de face em blocos, esta análise deve julgar se o envelopamento executado com o reforço é suficiente para garantir integridade de cada camada na região de face.

Este trabalho enfoca, basicamente, a estabilidade interna das estruturas reforçadas.

3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Existem muitas propostas para o dimensionamento de estruturas de solo reforçado. Os vários métodos se diferenciam com relação às hipóteses e condições em que se baseiam; podem variar com relação à consideração dos efeitos de cada parâmetro de entrada, tipo de carregamento externo, existência da coesão interna do solo de aterro, e a configuração geométrica da cunha de ruptura.

Por admitirem condições diferenciadas e se apoiarem em hipóteses distintas, os métodos apresentam aplicabilidade e limitações também diferenciadas. Neste sentido, alguns métodos objetivam ser mais práticos, outros mais abrangentes. Os diversos métodos de cálculo que abordam o problema de estruturas de solo reforçado adotam, em geral, um dos seguintes princípios:

- método de Coulomb: hipótese de cunha linear; faz a análise por equilíbrio limite;
- método de Rankine: hipótese de cunha linear; deriva do método de Coulomb e baseia-se no princípio de tensões ativas de Rankine;
- método dos Dois Blocos: hipótese de cunha bi-linear; faz a análise por equilíbrio limite;
- método de Bishop Modificado: hipótese de cunha circular; faz a análise por equilíbrio limite;
- método dos Deslocamentos: hipótese de cunha circular, focando o comportamento do geossintético na estrutura;
- método de Leschinsky: hipótese de cunha na forma de espiral logarítmica; faz a análise por equilíbrio limite;
- Elementos Finitos: através da discretização da estrutura, faz-se a análise em cada um de seus elementos.

Os métodos que se baseiam no princípio do

equilíbrio limite consideram o equilíbrio de forças ou de momentos, buscando a cunha crítica de ruptura.

Leshchinsky (1998) discute a evolução da metodologia de análise da estabilidade e dimensionamento de estruturas de solo reforçado e afirma que a tendência atual é se fazer o dimensionamento por métodos de equilíbrio limite - como é o caso dos métodos de Coulomb e dos Dois Blocos - em lugar do método simplificado de Rankine. Também, cita a preocupação atual com os parâmetros de resistência dos geossintéticos e a necessidade de se considerar os fatores de redução da resistência nominal, já que os fenômenos de perda de resistência do material em serviço vêm sendo mais amplamente estudados.

4 MÉTODOS DE CUNHA PLANA

Este trabalho contempla três métodos de dimensionamento que consideram cunha plana de ruptura. São três das formulações mais simples para o dimensionamento de estruturas de solo reforçado e, por serem mais práticos, são três dos mais utilizados com este propósito, ainda que em caráter preliminar, em projetos dessa natureza. Algumas hipóteses são comuns a estes três: o solo de aterro é considerado homogêneo e isotrópico, analisam cunhas que passam pelo “pé” do talude na face e são válidos apenas para taludes não excessivamente abatidos, sendo o dos Dois Blocos menos limitado neste aspecto.

4.1 Método de Coulomb

O método de Coulomb, como é conhecido, trabalha sobre uma superfície de ruptura linear; trata a massa de solo como um corpo rígido com risco de escorregar sobre este plano. A cunha crítica de ruptura é a que apresenta o maior empuxo, tarefa facilitada quando se trabalha com rotinas computacionais (Lambe e Whitman, 1979, por exemplo).

O método permite considerar tanto o ângulo de atrito quanto a coesão do solo de aterro e o efeito de qualquer tipo de sobrecarga. Para tanto é importante que se analise adequadamente os efeitos destas sobrecargas no plano de ruptura.

A maior limitação deste método, no entanto, é que deve ser usado apenas em situações de talude vertical ou quase-vertical (inclinação da

face da estrutura com a horizontal de 70° ou mais, conforme indica a literatura, Silva, 1998). Esta condição se justifica pois, para taludes abatidos, deixa de ser razoável considerar cunha de ruptura linear, como é evidenciado por análise algébrica.

Para o dimensionamento do reforço, considera-se que, no caso dos esforços solicitantes não serem equilibrados pela própria resistência interna do solo, deve-se prover a estrutura com uma força resistente adicional que equilibre o conjunto de esforços. Esta força resistente seria conferida pelo sistema de reforços na estrutura, como ilustra a Figura 1.

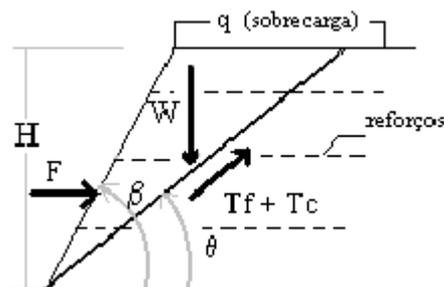
O método de Coulomb, pelos princípios descritos, sendo c a coesão e ϕ o ângulo de atrito internos do solo, pode ser equacionado da seguinte forma:

$$F = R \operatorname{sen}(\theta - \phi) - T_c \cos \theta \quad (1)$$

sendo:

$$R = \frac{W + qH(\cot g\theta - \cot g\beta) - T_c \operatorname{sen} \theta}{\cos(\theta - \phi)} \quad (2)$$

$$T_c = c (H/\operatorname{sen}\theta) \quad (3)$$



- F – força necessária para o equilíbrio
- W - peso do solo que escorregaria
- q - sobrecarga uniforme sobre o aterro
- T_f – resistência à ruptura devido ao atrito interno do solo
- T_c – resistência à ruptura devido à coesão
- β - inclinação do muro
- θ - inclinação do plano de ruptura
- H - altura do aterro

Figura 1. Método de Coulomb.

Estimada a solicitação total em tração do reforço, o projetista deve assumir uma configuração de distribuição e especificar as várias camadas de reforço, respeitando critérios de espaçamento máximo, comprimento de

ancoragem, envelopamento, etc.

É comum se assumir uma distribuição triangular dos reforços no sentido de considerar camadas com reforços mais resistentes na base da estrutura para casos sem sobrecarga ou com sobrecarga uniforme. No entanto, para outros tipos de sobrecarga, esta distribuição é certamente alterada, devendo-se considerar seus efeitos.

4.2 Método de Rankine

Numa situação simplificada, onde a parede do muro é vertical, o solo é homogêneo e isotrópico, e sobrecarga eventual uniforme, a partir do método de Coulomb chega-se à seguinte expressão para a força total necessária de tração nos reforços, desconsiderando fatores de segurança:

$$F = \frac{1}{2} H^2 k_a + q H k_a - 2 c H (k_a)^{1/2} \quad (4)$$

sendo k_a denominado empuxo ativo o qual vale, nessa situação simplificada:

$$k_a = [\text{tg}(45^\circ - \phi/2)]^2 \quad (5)$$

o que dá origem ao método de Rankine.

O método de Rankine tem por principais hipóteses que as tensões principais atuam nos planos vertical e horizontal e que as tensões horizontais atuantes na altura h em qualquer ponto da estrutura (Figura 2) valem:

$$\sigma_{hi}' = [\gamma (H-h_i) k_a] + (q k_a) - 2 c (k_a)^{1/2} \quad (6)$$

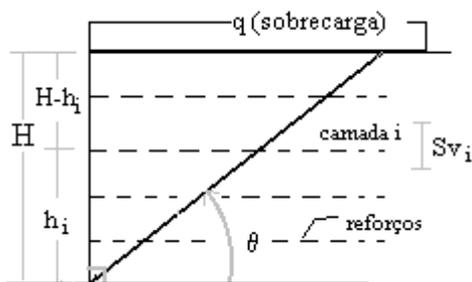


Figura 2. Método de Rankine.

O método propõe uma simplificação da análise por equilíbrio limite, partindo da premissa de que a análise dos esforços pode ser feita sobre a face da estrutura (parede externa da massa que rompe), o que leva ao mesmo resultado que para uma análise sobre a cunha de ruptura, na situação de solo homogêneo, sem

fluxo de água e condição de sobrecarga apenas uniforme.

Nesta proposta o cálculo é feito diretamente para cada camada de reforço, admitindo-se que a cunha crítica está a $(45^\circ + \phi/2)$ com a horizontal, diferentemente da proposta de Coulomb. A proposta de Rankine para o dimensionamento de estruturas de solo reforçado segue a seguinte formulação:

$$F_i = [\gamma (H-h_i) s_{vi} k_a] + (q s_{vi} k_a) - 2 c s_{vi} (k_a)^{1/2} \quad (7)$$

sendo F_i a sollicitação e h_i a altura de cada camada de reforço, e s_{vi} a área de contribuição para cada camada de reforço.

A força total de tração que deve ser garantida pelo sistema de reforços deve ser, então, o somatório das forças em cada camada ao longo de toda a altura do muro. Matematicamente, a força total no sistema de reforço pode ser obtida a partir da integração da função que representa a tensão horizontal ao longo de toda a altura do muro.

A maior parte das rotinas de cálculo, sobretudo as utilizadas no hemisfério norte, não costuma considerar a coesão no dimensionamento por este método. No caso de materiais não coesivos poder-se-ia analisar casos de parede não vertical, considerando-se a equação proposta por Coulomb em 1776 (Lambe, 1979).

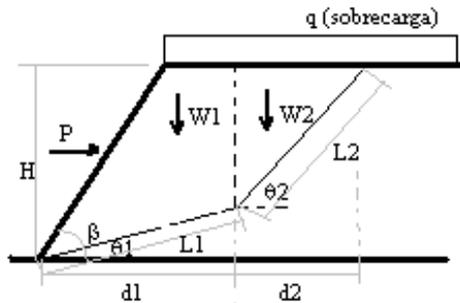
4.3 Método dos Dois Blocos

O método dos Dois Blocos segue basicamente os mesmos princípios do método de Coulomb. No entanto, a grande vantagem daquele sobre este é a possibilidade de se poder analisar estruturas com faces em talude mais abatidos.

Esta condição de maior abrangência decorre da hipótese de ocorrência de cunha de ruptura com configuração bi-linear (isto é, a cunha apresenta a configuração de dois planos consecutivos, Figura 3). É uma proposta interessante na medida em que se aproxima da cunha real, pois quanto mais abatido for o talude, maior é a tendência de se ter cunhas críticas de ruptura circulares (Leschinsky, 1998). Próximo ao limite de definição de paredes quase-verticais a configuração bi-linear simula bem a cunha de ruptura real.

Partindo desta premissa, o método propõe uma análise de dois blocos de solo compondo a massa que rompe. Assim como no método de

Coulomb, deve-se fazer a análise do equilíbrio de esforços no plano da cunha de ruptura crítica (que é buscada iterativamente), verificando-se a necessidade de uma força resistiva adicional para promover este equilíbrio nos níveis de segurança desejados.



sendo: $0 \leq \theta_1 < \beta$; $\theta_1 \leq \theta_2 \leq 90^\circ$; $0 \leq d_1 \leq H \cot \theta_1$

Figura 3. Método dos Dois Blocos

Uma das questões de análise é a da interação entre os dois blocos no plano que os divide, considerando-se parâmetros de interface variando da resistência ao cisalhamento residual à resistência ao cisalhamento do material de aterro. Em outras palavras, pode-se ter, como limites inferiores para os parâmetros nesta interface, um ângulo de atrito obtido para deformação a volume constante (ângulo de atrito residual, ϕ_{cv}) e uma coesão nula.

O método dos Dois Blocos (ou Duas Cunhas) propõe a seguinte formulação:

$$F = R_2 \cos \phi_w - R_1 \sin(\phi - \theta_1) - c L_1 \cos \theta_1 \quad (8)$$

sendo:

$$R_2 = \frac{(W_2 + qd_2) \operatorname{tg}(\phi - \theta_2) + cL_2 [\cos \theta_2 - \sin \theta_2 \operatorname{tg}(\phi - \theta_2)]}{\sin \phi_w \operatorname{tg}(\phi - \theta_2) - \cos \phi_w} \quad (9)$$

$$R_1 = \frac{[W_1 + q(d_1 - H \cot g \beta)] + R_2 \sin \phi_w - cL_1 \sin \theta_1}{\cos(\phi - \theta_1)} \quad (10)$$

onde c é a coesão do solo do aterro, ϕ é o ângulo de atrito interno e ϕ_w é o ângulo de atrito entre os blocos; W_i é o peso da massa de solo do bloco i com potencial de rompimento.

4.4 Considerações sobre Carregamentos

É bastante comum a ocorrência de algum tipo de carregamento sobre a estrutura reforçada, quando esta não tem apenas a finalidade de

contenção. Nesta situação, os efeitos destas sobrecargas podem ser muito importantes no cálculo do reforço. A magnitude desta influência sobre os resultados do dimensionamento decorrem de dois aspectos: o tipo de carregamento considerados no cálculo, e o valor destas cargas.

Muitas são as possibilidades de ocorrência de sobrecarga (uniformemente distribuída, distribuída localizadamente, variavelmente distribuída, linear, etc). Para cada uma destas configurações, estão definidas equações algébricas (Craig, 1997) para a análise de seus efeitos em cálculos desta natureza; muitas vezes, análises algébricas complexas, sobretudo porque devem ser considerados os acréscimos de carga atuando na cunha de ruptura. Acréscimos atuando na face da estrutura entram na análise de estabilidade local.

No entanto, geralmente é muito difícil classificar perfeitamente o carregamento real em uma destas categorias. O mais comum em projetos nos quais ocorrem solicitação de sobrecarga, é considerar o carregamento como uniformemente distribuído sobre toda a plataforma no topo da estrutura.

Outra questão que vem sendo levantada e também é muito interessante é a consideração da sobrecarga na análise de ancoragem do reforço. Muitas vezes, dependendo da natureza desta sobrecarga, diferentes considerações podem ser feitas. Se for do tipo permanente (prevista para sempre ocorrer sobre a estrutura, como por exemplo, uma edificação), poderia ser considerado o seu efeito confinante no cálculo do comprimento de ancoragem das camadas de reforço. Por outro lado, seria contra a segurança considerar a contribuição ao confinamento de uma sobrecarga do tipo acidental (solicitação eventual). Além disso, por não ser um carregamento permanente, pode ser interessante um estudo da influência dessa sobrecarga acidental sobre o efeito de fluência do reforço.

5 ESTUDO PARAMÉTRICO

5.1 Programa

O software SoloRef foi elaborado para a implementação dos métodos de Rankine, Coulomb e Dois Blocos. O programa permite, portanto, uma comparação entre os resultados obtidos com cada um, podendo-se avaliar os efeitos de se trabalhar com hipóteses

diferenciadas no cálculo de estruturas de solo reforçado. Algumas análises focando parâmetros de entrada do cálculo, e os resultados estão aqui apresentadas.

O programa SoloRef contempla a possibilidade de ocorrência de dois tipos de sobrecarga: uniformemente e linearmente distribuídas. Desta forma, apenas a influência destes dois tipos de sobrecarga foram analisadas. Na tentativa de simular uma eventual existência de tráfego de veículos sobre o aterro (sem considerar os efeitos de carga dinâmica) pode-se lançar mão de um duplo carregamento pontual cuja extensão cobre todo o comprimento da estrutura e os pontos de aplicação são distanciados pela largura do eixo do veículo crítico considerado. Nos casos dos métodos de Coulomb e dos Dois Blocos, interessam os efeitos do carregamento sobre cada ponto ao longo da cunha de ruptura.

5.2 Análise Paramétrica

Utilizando o programa Soloref como ferramenta de cálculo, foi possível perceber algumas diferenças entre os resultados obtidos com os três métodos de cálculo focados no presente

trabalho e mensurar os efeitos de alguns parâmetros de entrada na análise.

A partir desta análise paramétrica, foi possível confirmar algumas das limitações de validade destes métodos e a necessidade de se trabalhar com os parâmetros de entrada com o máximo de acurácia possível, para que se tenha cálculos confiáveis e ao mesmo tempo econômicos. Os resultados de algumas análises são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3.

Foram considerados em todos os cálculos: peso específico do solo de aterro (γ_{aterro}) como sendo 19 kN/m^3 , estrutura sem talude de topo ($H_t = 0$), e sobrecarga uniformemente distribuída igual a zero ($q = 0$). O símbolo P é a sobrecarga linear e F a resistência do sistema de reforços necessária calculada; os símbolos “ x_o ” e “e” indicam, respectivamente, a posição e o eixo do veículo, ou seja, a posição da primeira carga em relação à borda e a da segunda em relação à primeira; os outros símbolos estão definidos nas Figuras 1, 2 e 3.

Uma observação a ser feita é que o método dos Dois Blocos não foi implementado no programa SoloRef considerando a possibilidade de analisar sobrecarga linear. Por isso a Tabela 2 não apresenta resultados por esta proposta.

Tabela 1. Efeitos da altura da estrutura; $\beta = 90^\circ$, $\phi_w = \phi$ (Dois Blocos), $P = 0$.

H (m)	c (kPa)	ϕ (°)	Coulomb		Rankine		Dois Blocos			
			F (kN/m)	θ (°)	F (kN/m)	θ (°)	F (kN/m)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	d (m)
3	0	30	29	60	29	60	29	60	-	-
	10	19	1	54	1	54	1	54	-	-
	0	19	44	54	44	54	44	54	-	-
6	0	30	114	60	114	60	114	60	-	-
	10	19	88	54	88	54	88	54	-	-
	0	19	174	54	174	54	174	54	-	-
10	0	30	317	60	317	60	317	60	-	-
	10	19	341	54	341	54	341	54	-	-
	0	19	483	54	483	54	483	54	-	-

Tabela 2. Efeitos da sobrecarga linear; $\beta = 90^\circ$, $H = 6 \text{ m}$, $P = 40 \text{ kN/m}$, $e = 2,5 \text{ m}$.

x_o (m)	c (kPa)	ϕ (°)	Coulomb		Rankine	
			F (kN/m)	θ (°)	F (kN/m)	θ (°)
0,5	0	30	211	85	137	60
	10	19	196	85	111	54
	0	19	332	85	197	54
1,0	0	30	203	80	126	60
	10	19	188	80	110	54
	0	19	307	80	195	54

Tabela 3. Efeitos da inclinação de face; $H = 6$, $\phi_w = \phi$ (Dois Blocos), $P = 0$.

β (°)	c (kPa)	ϕ (°)	Coulomb		Rankine		Dois Blocos			
			F (kN/m)	θ (°)	F (kN/m)	θ (°)	F (kN/m)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	d (m)
85	0	30	98	56	103	60	98	56	-	-
	10	19	68	51	-	-	69	47	52	0,5
	0	19	154	50	163	54	154	50	-	-
80	0	30	84	53	91	60	84	52	54	1,0
	10	19	50	49	-	-	55	36	52	0,9
	0	19	138	46	152	54	138	44	48	1,0
75	0	30	71	51	80	60	73	46	54	1,4
	10	19	33	46	-	-	44	28	52	1,2
	0	19	122	43	141	54	126	35	47	1,4
70	0	30	60	48	68	60	63	41	54	1,7
	10	19	17	44	-	-	33	23	51	1,5
	0	19	109	40	129	54	116	28	47	1,7

Os resultados apresentados na Tabela 1 indicam que a resistência do reforço calculada não tem um comportamento linear em função da altura da estrutura, principalmente quando se considera a coesão do solo de aterro, como poderia ser esperado a princípio.

É interessante notar que na situação de face vertical, a proposta de Rankine é coerente com os outros métodos de cálculo, enquanto o método dos Dois Blocos leva a resultados de cunha linear, confirmando a coerência desta hipótese nesta situação. Nesta Tabela ainda podem ser comparados os efeitos sobre os resultados pela variação dos valores do ângulo de atrito e da coesão do solo do aterro.

Na análise foram considerados parâmetros de um solo tipicamente granular e de um coesivo; no terceiro caso tem-se apenas o objetivo de se permitir a comparação do efeito da coesão para um solo de baixo ângulo de atrito.

A Tabela 2 apresenta resultados de cálculo considerando a ocorrência de sobrecarga linear. Os valores para esta sobrecarga, neste caso, são os do eixo padrão rodoviário considerado em projetos de pavimentação.

Comparando-se estes resultados com os da Tabela 1, percebe-se a importância do carregamento de tráfego (como se pretendia simular nestes cálculos) sobre os resultados do dimensionamento. A configuração da cunha de ruptura, também é, de fato, bastante influenciada pela sobrecarga. A posição da cunha, neste caso, é função do ponto de aplicação da carga; nota-se que, no cálculo pelo

método de Coulomb, a configuração da cunha crítica acompanha a posição da primeira carga.

Um ponto importante é que este tipo de carregamento linear tem uma influência muito concentrada nas camadas superiores da estrutura, o que poderia alterar a configuração das camadas de reforço considerada (Koerner, 1998).

A Tabela 3 compara os resultados de cálculo para diferentes inclinações da face da estrutura em relação à horizontal. É interessante considerar também, nesta análise, os resultados apresentados na Tabela 1 para a seção de 6,0 m de altura ($\beta = 90^\circ$).

No caso de paredes verticais e quase-verticais com inclinação de até 75° ou 80° , os métodos de Coulomb e dos Dois Blocos levam a resultados bastante similares; o método dos Dois Blocos, nestes casos, quando não leva a resultados de cunha linear, obtém cunhas muito próximas dessa configuração. Disso se conclui que o método de Coulomb parece ser, realmente, aplicável para situações de face quase-vertical. No entanto, 70° já é uma situação de talude excessivamente abatido para a aplicação do método de cunha linear.

Quanto ao método de Rankine, à medida que a face é mais abatida, mais seus resultados se distanciam dos métodos de equilíbrio limite (Coulomb e Dois Blocos). Daí, pode-se confirmar que este método não é aplicável para situações de face não vertical, mesmo considerando o coeficiente de empuxo ativo para tal condição.

6 COMENTÁRIOS

Os métodos de dimensionamento por equilíbrio limite, apesar de serem já consagrados pela literatura, representam uma tendência atual em problemas de solo reforçado. Neste caso vem se considerando a distribuição de tensão horizontal atuante ao longo da estrutura, cuja maior concentração está nas camadas inferiores do aterro. O Prof. Bathurst, do Royal Military College of Canada, em palestra sobre estruturas de solo reforçado realizada no XI COBRAMSEG (Brasília, 1998) (a ser publicada num volume pós-congresso), apresentou resultados de pesquisa realizada em sua instituição, comparando comportamento em modelo de grandes dimensões e métodos de dimensionamento, inclusive por elementos finitos, concluindo pela boa aplicabilidade dos métodos de Coulomb e dos Dois Blocos para analisar este problema.

Sendo assim, o método de Coulomb é uma boa alternativa para dimensionamento de estruturas com taludes verticais ou quase-verticais, nos quais a cunha plana é uma hipótese razoável para inclinações de face em relação à horizontal superiores a 75° ou 80°. Para valores inferiores a este deve ser considerada uma superfície mais complexa. O método de Rankine, por outro lado, não é recomendável para situações de face inclinada, mesmo considerando um coeficiente de empuxo para esta situação, o que, teoricamente, permitiria empregar o método. Neste caso - face não vertical - a consideração da coesão não é válida e mesmo quando o solo não é coesivo os resultados se apresentam bem diferentes dos observados por equilíbrio limite. Isto pode ser demonstrado analiticamente.

Em dimensionamentos de estruturas de solo reforçado, a coesão do solo de aterro, em geral, não é considerada. No entanto, em muitos casos, é um parâmetro bastante importante, e a sua não consideração implica num elevado fator de segurança real da obra e num custo adicional desnecessário. Este é o caso, por exemplo dos solos brasileiros, que são, na maioria das vezes, bastante coesivos.

Para o dimensionamento de estruturas de solo reforçado, além das considerações sobre o método a ser adotado e a avaliação dos parâmetros de cálculo, devem ainda ser

cuidadosamente avaliadas todas as situações a que a estrutura estará submetida durante as fases de construção e de serviço. É importante a análise de cada fase, calculando-se os esforços e os respectivos comprimentos de ancoragem para as diversas situações de solicitação externa, como, por exemplo, sobrecarga de instalação, sem sobrecarga, com sobrecargas permanentes e acidentais, etc. Este tipo de análise considerando-se cada situação não é feita normalmente, o que pode levar, em muitos casos, a conclusões um tanto incompletas no dimensionamento de estruturas de solo reforçado.

Reflexões como estas são muito importantes, pois estruturas dessa natureza, em geral estão envolvidas em obras de grande responsabilidade, muitas vezes, envolvem custos de construção e de manutenção altíssimos. Um dimensionamento equivocado pode significar riscos de ruptura, e consequentemente riscos de vidas, ou gastos desnecessários durante a execução da obra.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio financeiro dado através de bolsa de iniciação científica do CNPq (PIBIC).

REFERÊNCIAS

- Craig, R. F., Soil Mechanics, *E& FN Spon*, 6ª edição, Londres, 1997.
- Koerner, R. M., Design With Geosynthetics, *Prentice Hall*, 4ª edição, New Jersey, 1998.
- Lambe, T.W. e Whitman, R.V. Soil Mechanics, SI Version. *John Wiley & Sons*, 553 pg, 1979.
- Leschchinki, D., Evolution of Design Methods for Geosynthetic Reinforced Steep Slopes and Walls in USA, XI COBRAMSEG, 1249-1256, Brasília, 1998.
- Silva, A. E. F., Rotinas Didáticas para Dimensionamento de Estruturas de Solo Reforçado com Geossintéticos, ITA, 1998.