

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/319162096>

Sobre a contribuição dos grampos à estabilidade de estruturas de solo grampeado

Conference Paper · August 2006

CITATIONS

0

READS

464

2 authors:



Waldemar Hachich

University of São Paulo

60 PUBLICATIONS 52 CITATIONS

SEE PROFILE



Víctor Enrique León Bueno de Camargo

4 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Modelagem e segurança de contenções [View project](#)



Geotechnical Engineering Education [View project](#)

Sobre a contribuição dos grampos à estabilidade de estruturas de solo grampeado

Waldemar Hachich

Prof. Titular, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica da Escola Politécnica da USP

Víctor Enrique León Bueno de Camargo

Mestre em Engenharia Geotécnica pela Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil.

RESUMO: Existem vários processos para se analisar a estabilidade de solos reforçados com grampos. Em diversas situações a rigidez transversal dos grampos pode ser considerada desprezível em comparação com a rigidez do maciço, de modo que o reforço é obtido essencialmente graças aos esforços axiais. Grande parte dos processos de análise propostos adotam essa hipótese simplificadora e conduzem, freqüentemente, a dimensionamentos muito similares àqueles que seriam obtidos com a consideração da rigidez e da capacidade resistente transversais. Neste artigo faz-se uma revisão crítica desses processos, procurando destacar pontos comuns e pontos de divergência entre eles, tanto do ponto de vista conceitual quanto do ponto de vista prático do dimensionamento final obtido pela sua aplicação a casos reais.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Grampeado, Equilíbrio Limite, Análise, Estabilidade, Rigidez.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de solo grampeado vêm sendo largamente empregadas em nosso meio técnico para contenção de escavações e encostas naturais, principalmente em obras viárias. Apesar da grande utilização e da disponibilidade, a partir da década de 80, de programas de computador baseados em processos racionais de análise, no Brasil muitas dessas obras vêm sendo projetadas quase exclusivamente com base na experiência do engenheiro em obras similares.

Como regras empíricas não explicitam os diversos fatores que influenciam a estabilidade da contenção, escasseiam projetos baseados em hipóteses claras e bem fundamentadas e em procedimentos de cálculo racionais e objetivos.

A predominância do empirismo não decorre, certamente, da ausência ou escassez de propostas de processos de análise e dimensionamento desse tipo de estrutura.

Talvez esteja faltando sistematização crítica dos processos de análise e comparação dos dimensionamentos resultantes. O presente artigo resume exatamente essas contribuições

da pesquisa de Camargo (2005), com ênfase nos processos de equilíbrio limite. Devido às limitações de espaço, o estudo comparativo pormenorizado dos diversos processos será apresentado em artigo submetido a periódico.

2 PROCESSOS FUNDAMENTADOS NO MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE

2.1 Processo do bloco monolítico

Muito particular é o processo que associa a região reforçada pelos grampos a um muro de arrimo do tipo gravidade e verifica a sua segurança contra os modos de ruptura usuais desse tipo de muro (escorregamento, tombamento, capacidade de carga e estabilidade geral). Está aí implícita a hipótese de que a interação entre grampos e solo é tão íntima que permite analisar o conjunto como se fora um bloco monolítico. Assim foi, de fato, na primeira estrutura de contenção em solo grampeado, o muro provisório de Versailles, em que os grampos curtos injetados estavam dispostos em uma malha densa, com espaçamentos horizontal e vertical de 0,75 m.

Experimentos de campo e em centrífugas, para as densidades usualmente menores, dão suporte a mecanismos de colapso com superfícies de escorregamento que não corroboram a presunção de comportamento monolítico, a não ser como limite, para densidades de reforço elevadas.

O “Nordic Handbook - Reinforced Soils and Fills” (Rogbeck et al., 2002) recomenda conservadoramente que seja verificada também — mas não exclusivamente — a segurança contra os modos de ruptura típicos de muros de arrimo.

Entre nós foram executadas obras significativas com projeto baseado nesse processo (Décourt et al., 2003), pelo que ele fica aqui consignado entre os processos baseados no método do equilíbrio limite, já que todas as verificações de segurança acima mencionadas pertencem rigorosamente a essa categoria, mesmo não analisando todas as formas comprovadas de interação entre o grampo e o solo circundante.

2.2 Processos que explicitam a interação grampo-solo

Todos os demais processos impõem o equilíbrio de uma massa potencialmente instável de solo, tal como no caso da estabilidade de taludes ou do cálculo de empuxos, porém levando em conta o efeito dos grampos. A função dos grampos é, portanto, elevar a níveis consagrados pela prática o coeficiente de segurança da escavação contra escorregamento. Esse conceito respalda a idéia de incorporar a contribuição dos grampos aos processos usuais de análise de estabilidade por equilíbrio limite.

Todos eles têm alguns pontos em comum:

- todos consideram a contribuição das forças de tração nos grampos;
- todos consideram (com base em evidência experimental) que as forças em cada grampo atingem seus valores máximos no ponto em que ele intercepta a superfície de escorregamento;
- a incorporação de pressões neutras é possível em todos os processos, embora apenas o de Jewell (1980) já inclua as forças correspondentes na dedução original;

- nenhum deles oferece um procedimento bem fundamentado para a previsão de deslocamentos (o que só é possível empiricamente ou com o recurso a análises tensão-deformação);
- nenhum deles oferece um procedimento bem fundamentado para a consideração e o dimensionamento do paramento.
As diferenças mais importantes entre os processos são as seguintes:
 - a representação geométrica do modo de colapso, nem sempre bem fundamentada em comprovação experimental;
 - a consideração da contribuição dos grampos:
 - vários processos não levam em consideração todos os esforços suportados pelos grampos;
 - nem todos permitem quantificar a contribuição individual de cada grampo, fornecendo apenas os esforços globais necessários ao equilíbrio;
 - os valores dos coeficientes parciais de segurança são significativamente diferentes e nem sempre consistentes com a indispensável compatibilização de deslocamentos.

A Tabela 1 resume hipóteses e características dos diversos processos.

Alguns autores (Mitchell e Villet, 1987, Silva e Vidal, 1999) consideraram razoável estender ao solo grampeado o processo de Culmann, comprovadamente satisfatório para a análise de taludes íngremes não grampeados (Taylor, 1948). As Recomendações CLOUTERRE (1991) rejeitam esse modo de colapso e esse tipo de análise, com base em resultados de diversos experimentos de campo e de laboratório (alguns dos quais em centrífugas). Apesar disso, até mesmo artigos mais recentes (Ho e Sheahan, 2003, por exemplo) continuam a apresentar o processo como inovador.

A hipótese de pequena influência dos grampos na forma e localização da superfície crítica está implícita também no trabalho de Falconi e Alonso (1996), no qual a pesquisa da superfície circular crítica é conduzida no maciço não reforçado, para posterior incorporação dos efeitos do reforço.

Tabela 1. Comparação de processos: hipóteses e características

		Bloco monolítico	Silva e Vidal (1999)	Stocker et al. (1979)	Cardoso e Fernandes (1986)	Jewell (1980)	Bridle (1989)	Davis (Shen et al., 1982)	Falconi e Alonso (1996)	Homogeneização (Hachich, 1997)	Juran et al. (1990)	Multicritério (Schlösser, 1982)
modo de colapso	traço da superfície crítica	os modos usuais de muros de arrimo	reta	poligonal, 2 retas		poligonal, 2 retas	espiral logarítmica	parábola	arco de circunferência	arco de circunferência ou poligonal	espiral logarítmica	arco de circunferência ou poligonal
	divisão da zona ativa para análise		cunha única	2 cunhas (lamelas)		2 cunhas (lamelas)	n lamelas verticais	2 cunhas (lamelas)	n lamelas verticais	n lamelas verticais	m lamelas // grampos	n lamelas verticais
	aplicabilidade a solo grampeado testada em programa experimental?	não	não	sim		indiretamente	indiretamente	sim	indiretamente	indiretamente	sim	sim
F parâmetros (F_c e F_ϕ)		os valores usuais em muros de arrimo	$F_c = F_\phi > 1$	$F_c = F_\phi = 1$	$F_c = F_\phi > 1$	$F_c = F_\phi > 1$	não explicitados	$F_c = F_\phi > 1$	$F_c = F_\phi = 1,5$	$F_c = F_\phi > 1$	$F_c = F_\phi = 1$	$F_c = F_\phi = 1,5$
F arrancamento (F_a)		NA	$F_a = 1$ (?)	$F_a > 1$	$F_a = F_c = F_\phi$	$F_a = 1$	não explicitado	$F_a = F_c = F_\phi$	$F_a = 2$ (?)	$F_a = F_c = F_\phi$	$F_a = 2$	$F_a = F_c = F_\phi$
Esforços transversais nos grampos?		não	não	não	sim	não	sim	não	não	não	sim	sim
F transversal (F_t)		NA	$F_t = \infty$	$F_t = \infty$	$F_t = F_a = F_c = F_\phi$	$F_t = \infty$	não explicitado	$F_t = \infty$	$F_t = \infty$	$F_t = \infty$	$F_t = 1$	$F_t = 1$
Corte do solo pelo grampo?		não	não	não	sim	não	sim	não	não	não	não	sim ($F_p = 2$)
Permite considerar rigidez do paramento?		não	não	não		não	não	não	não	indiretamente	não	indiretamente
Possibilidade de arrancamento do grampo na zona ativa?		não	não	não		não	não	não	não	sim	não	sim
Solo heterogêneo?		sim	não	não		não	não	não	sim	sim	sim	sim
Requer programa de computador específico?		não	não	não		não	não	não	não	sim	sim	sim
Grampos influenciam na pesquisa da superfície crítica?		não	não	sim		sim	sim	sim	não	sim	sim	sim
Dimensionamento (D) ou verificação (V) do comprimento dos grampos?		V	D	V		D	D	V	D	V	D	V
Fornece esforços em cada nível de grampo?		não	não	não		não	sim	não	não	sim	sim	sim

Todos os demais processos de alguma forma consideram a influência dos grampos na forma ou na localização da superfície crítica. Aqueles que propõem modo de colapso em duas cunhas baseiam-se em geral nos ensaios dos alemães (Stocker et al., 1979). Outros apresentam argumentos (comprovados direta ou indiretamente) para superfícies de colapso em forma de parábola, espiral logarítmica ou arco de circunferência. Juran et al. (1990) denominam “cinemático” o processo por eles proposto (os próprios autores utilizam aspas em alguns trechos do artigo), aparentemente apenas pelo fato de a espiral logarítmica ser mais cinematicamente admissível do que outras formas de superfícies de escorregamento. Nesse sentido o processo de Bridle (1989) poderia pretender-se igualmente “cinemático”. Esses processos fundamentam-se, no entanto, no equilíbrio limite, como os demais, e não no teorema cinemático da análise limite.

O ajuste muito próximo dessas diversas superfícies às superfícies de escorregamento observadas confirma que a forma não é fator preponderante nas diferenças encontradas no dimensionamento, quando efetuado por diferentes processos.

3 CONTRIBUIÇÃO DOS GRAMPOS

Os grampos ficam sujeitos a esforços de tração e cisalhamento, bem como a momentos fletores.

Para o desenvolvimento dos esforços transversais (cisalhamento e flexão) é indispensável que o solo oponha resistência ao deslocamento transversal do grampo. Solos rígidos e resistentes garantiriam o aparecimento de esforços transversais significativos nos grampos, mas tais solos não são os que mais frequentemente necessitam de reforço. Nestes últimos os esforços transversais resultam, portanto, de menor magnitude. Acresce que o solo solicitado transversalmente por grampos de dimensões usuais só atingiria a resistência última para deslocamentos grandes — e indesejáveis.

As ponderações do parágrafo anterior foram confirmadas por experimentos de vários autores (por exemplo Bridle e Davies, 1997), que

comprovaram que a resistência axial última dos grampos usualmente empregados é atingida para deslocamentos muito menores do que os necessários para mobilizar os outros modos de ruptura do grampo (ou do solo circundante). Segundo o Additif 2002 (Projet National CLOUTERRE II, 2002) a contribuição dos esforços transversais fica limitada a 15% na melhor das hipóteses. Reside aí a justificativa para diversos dos processos considerarem que a contribuição dos grampos se restringe às forças axiais, bem como para a utilização de diferentes “coeficientes parciais de segurança” para as diferentes solicitações: não se trata de segurança em senso estrito, mas de compatibilidade de deslocamentos (Cardoso e Fernandes, 1986).

O processo de homogeneização (Hachich, 1997), assimila a contribuição dos grampos (limitada a forças de tração) a incrementos dos parâmetros de resistência do solo, que passam a c_R e ϕ_R de acordo com as equações:

$$\sigma \tan \phi_R = (\sigma + \Delta\sigma) \tan \phi \quad e$$

$$c_R = c + \Delta s ,$$

nas quais $\Delta\sigma$ e Δs representam as tensões normal e tangencial decorrentes das projeções respectivas das forças de tração nos grampos. Essas forças são determinadas a partir de comprimentos inicialmente admitidos para os grampos e do atrito solo-grampo (em unidades de tensão) determinado em ensaios de arrancamento ou por correlações (deduções teóricas propostas em alguns dos processos nunca lograram validação experimental convincente). O equilíbrio limite é verificado pelo processo de Spencer ou de Bishop simplificado, com lamelas verticais. A pesquisa da superfície crítica (circular ou poligonal) é feita para o solo já reforçado. Os resultados da análise permitem estimar as forças em cada nível de grampos, para verificação da segurança contra estados limites últimos de escoamento à tração.

Esse procedimento está em conformidade com as Recomendações CLOUTERRE (1991), pág. 102: “*Esses programas (baseados em processos de lamelas verticais, com grampos resistentes apenas à tração) dão resultados corretos desde que a consideração dos grampos seja feita ao nível das equações de equilíbrio do solo reforçado e não apenas do momento global*

no solo não reforçado. A presença dos grampos modifica, na verdade, as tensões normais que atuam na superfície de ruptura.” Dos trabalhos de Alonso e Falconi sobre o tema, o primeiro (1996) é o único que também atende a esses requisitos de equilíbrio. Aliás, a expressão do coeficiente de segurança global daquele trabalho é conceitualmente idêntica à expressão simbólica 7.2 do “Nordic Handbook - Reinforced Soils and Fills” (Rogbeck et al., 2002).

A tração nos grampos é limitada pelos seguintes dois valores:

- escoamento: a resistência última do material do grampo, integrada na área da sua seção transversal;
- arrancamento: a resistência última da interface solo-grampo, integrada na área dessa interface.

Práticas usuais de espaçamentos, materiais e técnicas construtivas, aliadas a observações de rupturas reais (Recomendações CLOUTERRE, 1991) justificam dimensionar para o arrancamento, verificando a seguir a segurança contra a ruptura do próprio grampo.

Schlösser (1982) propôs um processo que, por levar em conta todos os modos de ruptura dos grampos, tanto para esforços axiais quanto para esforços transversais, é denominado multicritério. O modo de ruptura mais crítico para cada nível de grampo decorre da própria análise, pelo princípio da maximização do trabalho. Esse processo permite verificar a segurança dos grampos de cada nível, assim como os de Juran, Bridle e de homogeneização. Nos demais os grampos são distribuídos em profundidade de forma empírica.

4 CASOS ANALISADOS

Para efeito de comparação dos processos foram analisados quatro estudos de caso:

- caso 1: obra já executada em São Paulo, estando disponíveis, para comparação, dados de comprimento e espaçamento dos grampos;
- caso 2: caso relatado como exemplo em Juran et al. (1990);
- casos 3: caso hipotético, com contribuição

transversal dos grampos;

- caso 4: caso hipotético idêntico ao 3, sem contribuição transversal dos grampos (grampos “flexíveis”).

A Tabela 2 reúne dados dos quatro casos analisados. Em todos eles foi considerado maciço seco e paramento em concreto projetado capaz de impedir o arrancamento dos grampos pela zona ativa.

Tabela 2. Dados dos casos analisados

Casos	1 (obra real)	2 (ex. Juran)	3 e 4 (hipotéticos)
altura (m)	12	12	7
L_{GRAMPO} (executado) (m)	10		
s_V (executado) (m)	1,3		
s_H (executado) (m)	1,3		
c (kPa)	44	12	14
ϕ (°)	14	35	30
γ (kN/m ³)	17	20	20
$f_{vk \text{ GRAMPO}}$ (MPa)	500	168	500
Φ_{GRAMPO} (mm)	20		20
Φ_{PERF} (mm)	75	100	75
inclinação dos grampos (°)	15	15	15
atrito solo-grampo (kPa)	140	120	60

Foram comparados os processos de cálculo de Jewell (1980), Davis (Shen et al., 1982), Falconi e Alonso (1996), homogeneização (Hachich, 1997), Juran et al. (1990) e multicritério (Schlösser, 1982). Em sua pesquisa, Camargo (2005) mostra que os processos de Culmann adaptado (Silva e Vidal, 1999) e de Stöcker et al. (1979) podem ser vistos como casos especiais do processo de Jewell, razão pela qual não foram incluídos na análise comparativa. Mostra também que a formulação apresentada por Bridle (1989) tinha alguns erros que conduziam a dimensionamento muito discrepante em relação aos demais, razão pela qual esse processo também não foi incluído na comparação. Um artigo posterior (Bridle e Davies, 1997) parece corrigir os problemas da primeira versão e o processo será incluído em comparação mais extensa, a ser publicada em periódico da área.

Obviamente os casos 3 e 4 só são distintos para os processos que permitem considerar a contribuição transversal dos grampos (Juran et al., 1990 e Schlösser, 1982).

Os resultados comparativos, apresentados na Figura 1, são auto-explicativos.

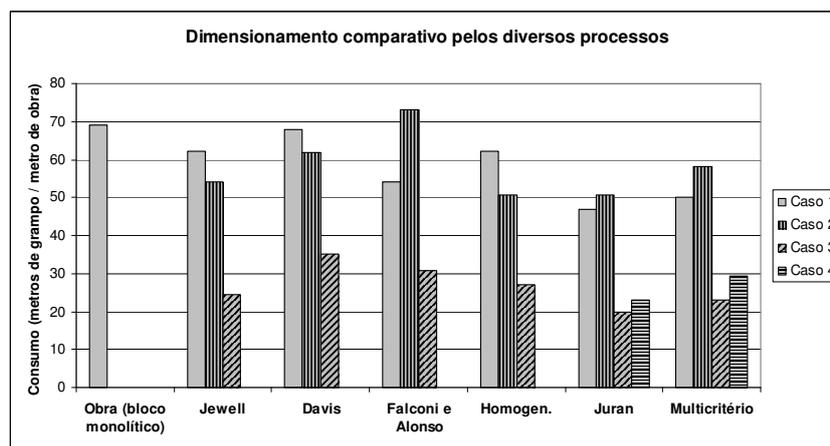


Figura 1 Resultado comparativo do dimensionamento dos 4 casos pelos 7 processos

5 CONCLUSÕES

Não é intenção deste artigo recomendar ou rejeitar qualquer um dos processos de análise baseados no método do equilíbrio limite.

Espera-se que a análise comparativa dos diversos processos, tanto do ponto de vista conceitual (Tabela 1) quanto do ponto de vista de aplicação (Figura 1), aqui apresentada de forma resumida, sirva de estímulo para que os projetistas que ainda não o fizeram escolham um processo de análise racional, bem fundamentado e que leve a resultados compatíveis com a boa prática.

REFERÊNCIAS

- Additif 2002 aux Recommandations CLOUTERRE 1991. *Projet national CLOUTERRE II*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- Bridle, R. J. (1989) Soil nailing – analysis and design. *Ground Engineering*. Cambridge
- Bridle, R.J. e Davies, M.C.R. (1997) Analysis of soil nailing using tension and shear: experimental observations and assessment. *Proc. Instn. of Civil Engineers. Geotechnical Engineering*.
- Camargo, V.E.L.B. (2005) *Comparação de métodos de análise de estruturas de solo grampeado*. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, USP. São Paulo.
- Cardoso, A.S. e Fernandes, M.M. (1986) Escavações pregadas: comportamento e dimensionamento. *Geotecnica*. Lisboa.
- Décourt, L., Zirlis, A. e Pitta, C.A. (2003) Projeto e comportamento de escavações estabilizadas com solo grampeado em São Paulo. In: *Solo Grampeado – Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento*. ABMS. São Paulo.
- Falconi, F.F. e Alonso, U.R. (1996) Considerações sobre o dimensionamento de uma estrutura de contenção em solo grampeado. *SEFE III*, ABMS. São Paulo.
- Hachich, W. (1997) *ESTÁVEL - Programa de Análise de Estabilidade de Taludes pelo Processo de Spencer*. Manual da versão 1.95. GEOEXPERT. São Paulo.
- Jewell, R.A. (1980) *Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soils*. Ph.D thesis. Univ. of Cambridge.
- Juran, I., Baudrand, G., Farrag, K., e Elias, V. (1990) Kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures. *J. Geotech. Engng*, Vol 116, N. 1. ASCE.
- Mitchell, J.K. e Villet, W.C.B. (1987) Reinforcement of earth slopes and embankments. *NCHRP Report 290*, USA Transp. Res. Board. NRC, Washington, D.C..
- Recommandations CLOUTERRE 1991 pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols. *Projet national CLOUTERRE*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1991.
- Rogbeck, Y., Alén, C., Franzén, G., Kjeld, A., Odén, K., Rathmayer, H., Watn, A., e Oiseth, E. (2002) *Nordic Handbook – Reinforced Soils and Fills*. Draft 2002-12-20. Nordic Geosynthetic Group.
- Schlösser, F. (1982) Behaviour and design of soil nailing. *Proc. Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques*. Bangkok.
- Sheahan, T.C. e Ho, C.L. (2003) Simplified Trial Wedge Method for Soil Nailed Wall Analysis. *J. Geotech. and Geoenviron. Engng.*, Vol. 129, N. 2. ASCE.
- Shen, C. K., Kim, Y. S., Bang, S., e Mitchell, J. F. (1982) Centrifuge modeling of lateral earth support. *J. Geotech. Engineering*, Vol 108, N. GT9. ASCE.
- Silva, A.E.F. e Vidal, D. (1999) Estruturas em solo reforçado e os métodos de dimensionamento por equilíbrio limite. *Anais do 3º Simpósio Bras. sobre Aplic. de Geossintéticos*. ABMS. Rio de Janeiro.
- Stocker, M. F.; Korber, G. W.; Gässler, G. e Gudehus, G. (1979) Soil Nailing. *Anais da 2ª Conf. Intl. Renforcement des Sols*. Presses de l'ENPC. Paris.
- Taylor, D.W. (1948) *Fundamentals of soil mechanics*. Wiley, New York, pp. 429–431.