

COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM SOLO GRAMPEADO

Waldemar Coelho Hachich

Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da EPUSP

Víctor Enrique León Bueno de Camargo

Mestrando do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da EPUSP

RESUMO

O trabalho tem como objetivo comparar os processos mais usuais em nosso meio técnico para o dimensionamento de estruturas de solo grampeado. Para tanto são analisadas duas situações. A primeira delas é hipotética e foi publicada por Juran et al (1990) no artigo no qual é apresentado o seu processo de cálculo. São comparados as trações e os comprimentos de grampos resultantes da aplicação de cada um dos processos de cálculo estudados. A segunda utiliza dados de um solo brasileiro, sendo comparados os comprimentos de grampos efetivamente adotados na obra com aqueles obtidos pelos diversos processos de cálculo.

1. Exemplo hipotético do artigo de Juran et al (1990)

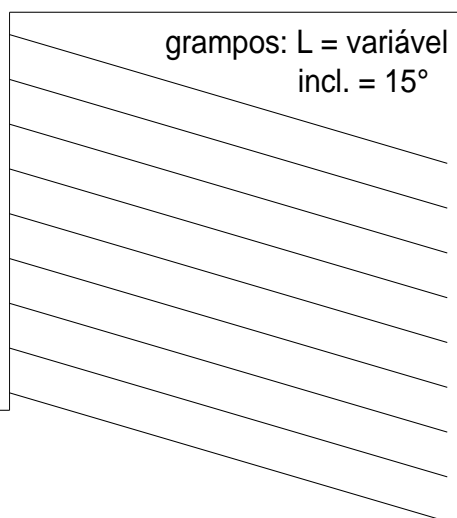
Foi escolhido um exemplo para o qual Juran et al (1990) apresentam a superfície de ruptura em detalhes e os esforços para cada grampo, calculados pelo processo por eles proposto. A escavação possui geometria simples, com face vertical e 12 m de altura. A figura 1 resume as informações do exemplo estudado.

Sempre que exigido pelo processo de cálculo, adota-se um comprimento **preliminar** para os grampos, uniforme e grande o suficiente para garantir que as superfícies críticas estejam contidas na zona reforçada.

CASO ANALISADO

H = 12 m
face vertical
 $e_v = e_h = 1,35$ m
diam. furo = 10 cm
barras 1", $f_{yk} = 168$ MPa

 $c' = 12$ kPa
 $\phi' = 35^\circ$
 $\gamma = 20$ kN/m³



A maioria dos processos (exceto aquele baseado no Estável) calcula uma tração máxima por metro longitudinal de obra e o comprimento dos grampos é ajustado *a posteriori*, com base nessa tração, de modo a garantir a segurança ao arrancamento.

Em seu artigo, Juran et al (1990) otimizam o comprimento dos grampos com base em um valor adotado de 120 kPa para o atrito solo-grampo, valor esse que foi aqui mantido para as comparações (e que equivale a um atrito unitário de 37,7 kN/m).

Figura 1. Características do exemplo analisado.

2. Comparações efetuadas

Todos os processos estão baseados no Método do Equilíbrio Limite, mas cada um deles tem critérios específicos para introduzir a segurança:

- Fellenius modificado (Falconi e Alonso, 1996 e Falconi e Alonso, 2002) e procesos similares (baseados em Bishop simplificado, Spencer, etc): FS no equilíbrio de momentos e no arrancamento dos grampos;
- Jewell (*in* HA68, 1994) e similares (Stocker et al, 1979): FS nos parâmetros (c' e ϕ');
- Davis (Shen et al, 1982): FS nos parâmetros (c' e ϕ');
- Juran et al (1988 e 1990): FS no arrancamento dos grampos; também é definido um FS parcial, aplicado ao momento fletor resistente do grampo; o autor adota valor unitário para esse FS;
- Estável (Hachich, 1997): por ser uma extensão dos processos de Bishop simplificado e Spencer, utiliza um único FS que se aplica tanto ao equilíbrio de momentos e forças quanto (indiretamente) ao arrancamento;
- Multicritério (Schlösser, 1982 e ENPC, 1993): FS no equilíbrio de momentos e na tensão normal na interface do solo com os grampos (“corte” do terreno pelo grampo), FS unitário no escoamento do aço e no arrancamento.

Esses diferentes critérios de segurança dificultam a comparação dos processos de cálculo. Para uma primeira comparação impõem-se FS's globais e parciais iguais a 1 e comparam-se as **trações máximas resultantes** ($T_{máx}$). Essa comparação não é a ideal pois, como se sabe, alguns coeficientes de segurança *precisariam* ser diferentes para garantir a compatibilidade de deslocamentos em situação de serviço.

Em seguida faz-se a comparação em termos dos **comprimentos resultantes** dos grampos pela aplicação de cada processo, já considerados os diferentes critérios de segurança recomendados pelos autores respectivos.

3. Comparação das trações

A tabela 1 apresenta um resumo das trações resultantes segundo cada processo. Apenas os processos de Juran e Multicritério consideram os esforços de corte nos grampos e permitem distribuição não uniforme das trações individuais em profundidade. Em alguns casos foi necessário ajustar os espaçamentos dos grampos para garantir que não se atingisse o escoamento do material das barras.

Tabela 1

PROCESSO	T_i/m (kN/m de obra)	$\Sigma T_i/m$ (kN/m de obra)	Corte nos grampos
FELLENIOUS MOD. 2002 (*)	73,5	809	não
DAVIS	45,7	412	não
JURAN	21,2 a 41,1 (média: 39,1)	352	sim
JEWELL	32,3	291	não
FELLENIOUS MOD. 1996 (**)	28,5	256	não
ESTÁVEL	27,7	250	não
MULTICRITÉRIO	25,2 a 26,9 (média: 26,1)	235	sim

(*) Espaçamento dos grampos: 1,1m x 1,1m. Calculado de acordo com o artigo publicado no 1º CLBG (Falconi e Alonso, 2002).

(**) Calculado de acordo com o artigo publicado no 3º SEFE (Falconi e Alonso, 1996)

A figura 2 compara graficamente as trações resultantes segundo cada processo.

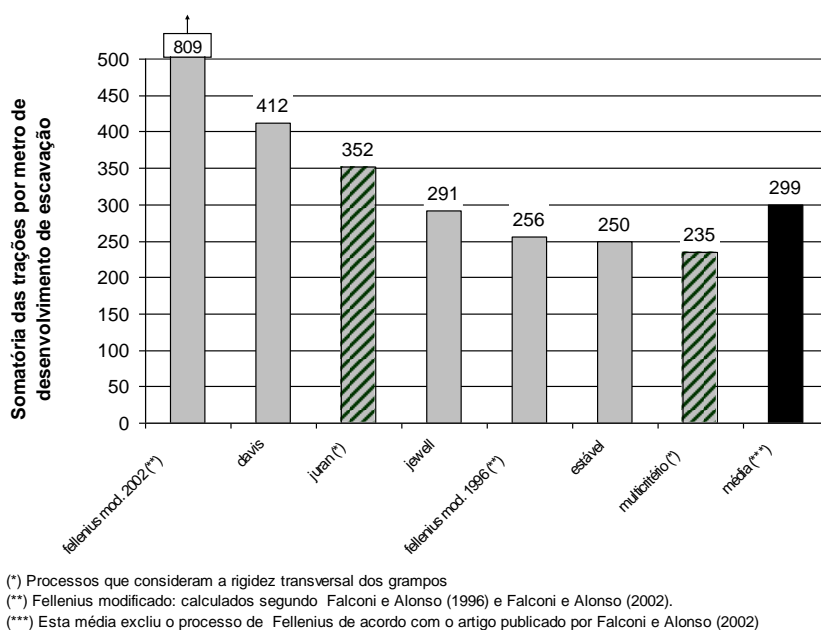


Figura 2. Exemplo hipotético - Trações resultantes segundo os diferentes processos de cálculo.

A média para os processos mencionados (excluído apenas o de Falconi e Alonso, 2002) é de aproximadamente 300 kN/m. O gráfico acima mostra que os processos de Jewell, Fellenius Mod. 1996, Multicritério e Estável fornecem resultados razoavelmente próximos entre si. O processo de Juran resultou numa tração total cerca de 20% maior do que a média. O processo de Davis resultou em uma tração total cerca de 40% maior do que a média; este último processo é passível de críticas quanto às expressões de equilíbrio de forças.

Este exemplo foi também verificado pelo processo proposto por Bridle (1989). Seus resultados não são apresentados no presente trabalho devido à disparidade extrema em relação aos demais processos, não só neste exemplo mas também em outros analisados.

4. Comparação dos comprimentos dos grampos

Para a comparação dos comprimentos totais de grampos por metro longitudinal de obra foram consideradas as diferentes definições de segurança recomendadas por cada um dos autores. Coeficientes de segurança globais foram adotados como sendo iguais a 1,5, a menos de orientações explícitas de cada autor.

Nos processos de Fellenius Mod. 1996, Fellenius Mod. 2002, Davis e Jewell foi necessário alterar o espaçamento entre os grampos, devido à tensão de escoamento relativamente baixa do material das barras (Juran et al, 1990, utiliza grampos de alumínio neste exemplo). Por essa razão não seria adequada a comparação **direta** dos comprimentos dos grampos.

O comprimento dos grampos também deve atender à condição de estabilidade global da estrutura. Neste exemplo em particular, porém, a estabilidade global não foi condicionante para o dimensionamento, já que o círculo crítico, para o qual $FS = 1,5$, intercepta a zona grampeada (círculos externos teriam FS maior).

A aplicação do processo de Fellenius Modificado 2002 (Falconi e Alonso, 2002) resultou em trações e comprimentos muito maiores do que aqueles obtidos com a primeira versão desse processo (Falconi e Alonso, 1996). Esse fato se deve à não consideração, na versão de 2002, do acréscimo de resistência na base das lamelas devido à componente normal do esforço nos grampos. Em solos com ângulo de atrito elevado o efeito pode ser muito significativo.

As figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, a posição das superfícies críticas e os comprimentos totais de grampos, calculados por metro longitudinal de obra.

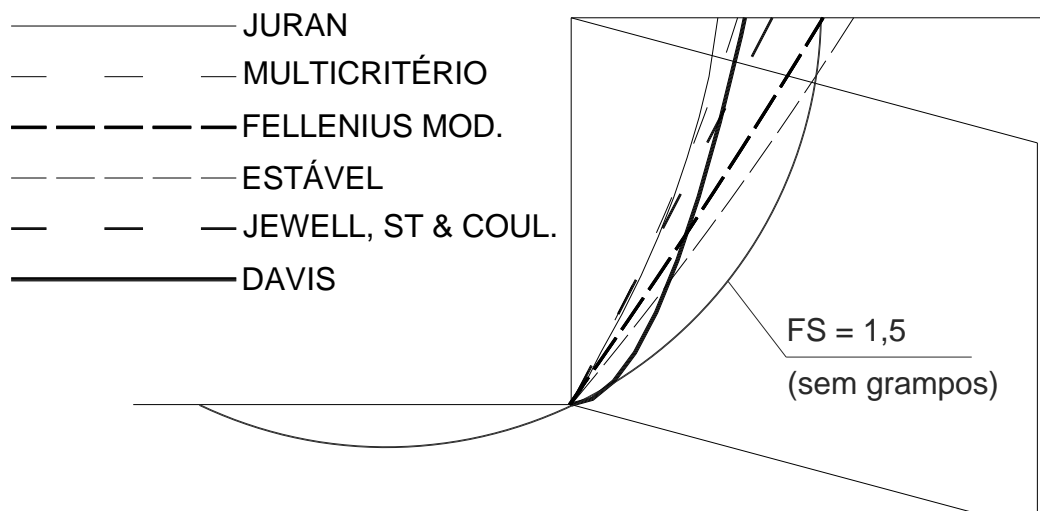


Figura 3. Exemplo hipotético - Superfícies críticas de cada processo e superfície crítica (sem os grampos) com FS = 1,5.

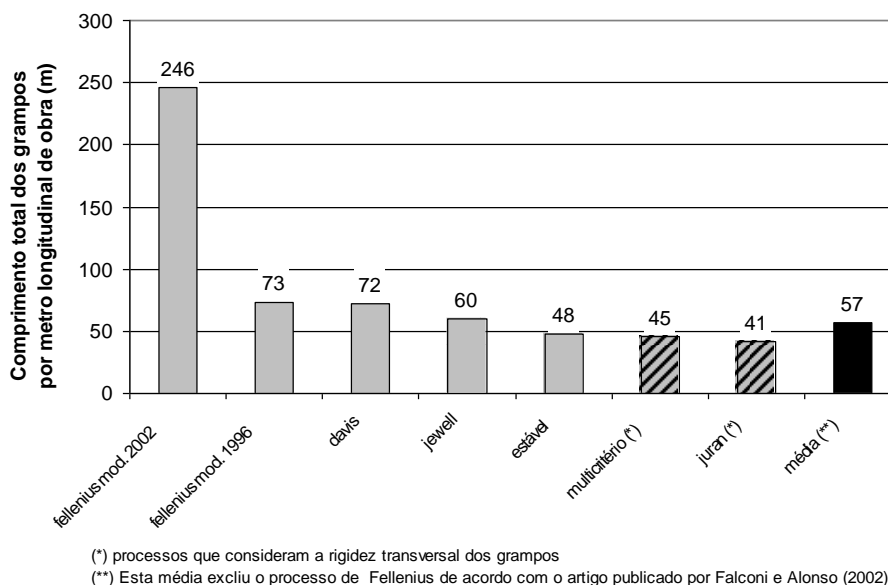


Figura 4. Exemplo hipotético - Comprimentos totais de grampos por metro longitudinal de obra.

O comprimento total médio dos grampos foi de 57 m por metro longitudinal de obra (excluído apenas o resultado do processo de Falconi e Alonso, 2002). Embora as trações resultantes cheguem a apresentar dispersões de até 40% em relação à média, em termos de comprimento total de grampos por metro longitudinal de obra essas dispersões caem para cerca de 30%. Isto ocorre porque o comprimento total do grampo é definido não só pela **tração**, mas também pela **posição da superfície crítica** determinada em cada processo.

5. Exemplo real de uma obra no Brasil

Analisa-se um caso real, com desempenho satisfatório até o momento, tanto em termos de estabilidade quanto em termos de deslocamentos. O dimensionamento resultante da aplicação de cada processo é comparado com a obra efetivamente executada. Adotou-se um FS de projeto igual a 1,5. O processo de Juran não pode ser aplicado pois depende, em uma de suas etapas, da utilização de “software” específico não disponível.

A escavação foi executada em uma argila silto arenosa e possui geometria semelhante à do caso anterior (12 metros de altura, face vertical), sendo os espaçamentos dos grampos ligeiramente diferentes: $e_h = 1,3$ m e $e_v = 1,4$ m. O solo apresenta coesão de 44kPa, ângulo de atrito de 14° e peso específico de 17 kN/m^3 , parâmetros esses determinados em ensaios de laboratório. O limite de escoamento do material das barras do grampo é de 500 MPa. Na falta de ensaios de arrancamento, para o atrito solo-grampo foi adotado o valor mínimo recomendado pela Georio (2000), 60 kPa.

Os grampos foram executados, na obra, com comprimento uniforme de 12 m. A figura 5 apresenta as superfícies críticas dos diversos processos.

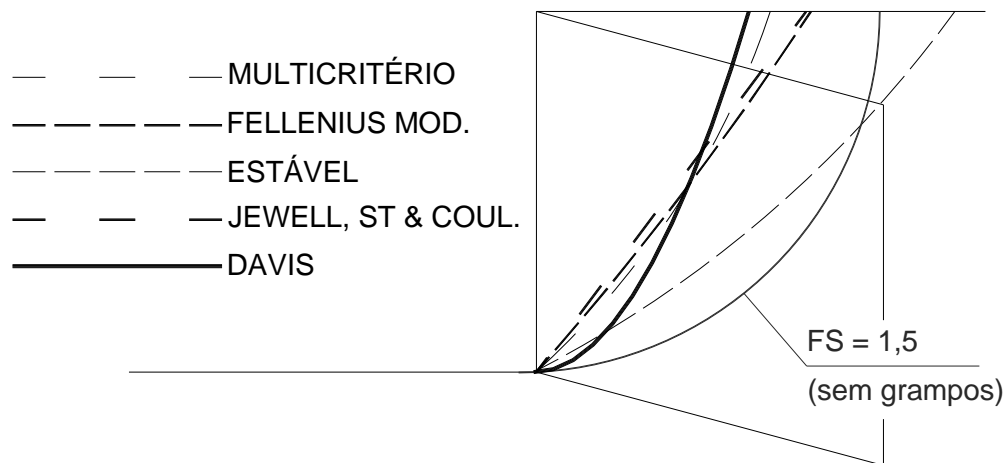


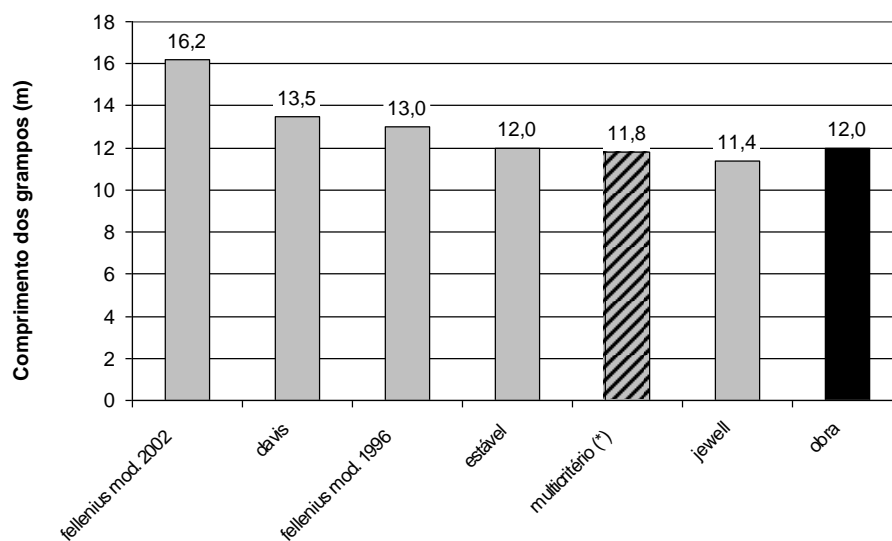
Figura 5. Exemplo real - Superfícies críticas de cada processo e superfície crítica (sem os grampos) com FS = 1,5.

A tabela 2 e o gráfico da figura 6, por sua vez, apresentam os resultados encontrados em termos de comprimento dos grampos. Neste exemplo, nas análises com todos os processos foi possível manter os espaçamentos de grampos utilizados na obra, razão pela qual é possível a comparação direta dos comprimentos dos grampos, sem a necessidade de recurso ao comprimento total por metro longitudinal de obra (utilizado no item 4).

Novamente os maiores comprimentos resultaram do processo de Davis (excluindo-se o processo de Fellenius Modificado, versão 2002), enquanto os processos de Jewell, Multicritério e Estável resultaram nos menores comprimentos, todos eles bastante próximos do executado na obra. As diferenças máximas em relação à média foram da ordem de 10% em termos de comprimentos dos grampos e de 30% em termos de trações.

Tabela 2

PROCESSO	L passivo (m)	L total (m)
FELLENIUS MODIFICADO (2002)	8,6	16,2
DAVIS	7,0	13,5
FELLENIUS MODIFICADO (1996)	5,4	13,0
EXECUTADO NA OBRA	-	12,0
ESTÁVEL	-	12,0
MULTICRITÉRIO	4,7	11,8
JEWELL	4,1	11,4



(*) processos que consideram a rigidez transversal dos grampos

Figura 6. Exemplo real - Comprimentos de grampos resultantes segundo cada processo de cálculo (espaçamentos constantes para todos os processos).

6. Conclusões

Apesar dos diferentes processos analisados apresentarem dispersões com relação à média de até 40% em termos de trações por metro de obra, essas diferenças caem para 30% ou menos quando a comparação é feita em termos dos comprimentos totais dos grampos. Mantidos os mesmos espaçamentos de grampos em todos os processos, as diferenças em termos de comprimentos podem cair para cerca de 10%, dependendo dos parâmetros de resistência do solo e da interface solo-grampo.

O processo proposto por Bridle (1989) também foi aplicado aos exemplos estudados. Os resultados dessas análises não são apresentados por serem muito díspares dos demais, pelo menos em parte devido a erros encontrados nas expressões do artigo publicado.

A aplicação plena do processo de Juran requer “software” específico. Para pré-dimensionamento podem ser utilizados os ábacos apresentados pelo autor, para alguns valores pré-estabelecidos de ângulo de atrito. Por essa razão o exemplo hipotético foi exatamente aquele já resolvido no artigo de Juran et al (1990).

Os processos de Davis e Fellenius Modificado 2002 resultaram em trações e comprimentos maiores nos dois exemplos analisados. As discrepâncias encontradas na comparação com os demais processos decorrem provavelmente das falhas nas expressões do equilíbrio de forças de ambos os processos.

Os processos de Jewell, Muticritério e Estável apresentaram resultados bastante próximos, tanto entre si quanto em relação à obra do exemplo do item 5. Destes processos, o Multicritério tende a levar a arranjos ligeiramente mais econômicos por considerar a mobilização de esforços de corte nos grampos: nos dois exemplos analisados as trações calculadas segundo o processo Multicritério aumentariam em cerca de 10% se desconsiderada essa mobilização. O efeito é tanto mais pronunciado quanto menos flexível for o grampo utilizado.

REFERÊNCIAS

- Bridle, R. J. *Soil nailing – analysis and design*. Ground Engineering. Set., 1989. p. 52-56.
- ENPEC - L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. *Recommendations Clouterre*, 1991. (English translation: Washington, D.C., Federal Highway Administration, 1993)
- Falconi, F. F.; Alonso, U. R. *Considerações sobre o dimensionamento de uma estrutura de contenção em solo grampeado*. In 3º Seminário de engenharia de fundações especiais e geotecnia, São Paulo, 1996. Vol 2, p. 301-308
- Falconi, F. F.; Alonso, U. R. *Solo grampeado sem concreto projetado – proposição para a estabilização de taludes rodoviários*. In 1º Congresso luso brasileiro geotecnia, São Paulo, 2002
- GEORIO – Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. *Manual técnico de encostas: ancoragens e grampos*. 2.ed. Rio de Janeiro, 2000 (Coleção Manual Técnico de Encostas, v.4)
- HA68. *Design manual for roads and bridges*. Volume 4, Part 4 - Geotechnics and drainage – Design methods for the reinforcement of highway slopes by reinforced soil and soil nailing techniques. Reino Unido, 1994
- Hachich, W. *ESTÁVEL - Manual de utilização*. 1997
- Juran, I.; Baudrand, G.; Farrag, K.; Elias, V. *Kinematical limit analysis approach for the design of nailed soil retaining structures*. In Geotechnical symposium on theory and practice of earth reinforcement. Fukuoka, Japão, 1988. p. 301-306
- Juran, I.; Baudrand, G.; Farrag, K.; Elias, V. *Kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures*. Journal of Geotechnical Engineering, Vol 116, No. 1. ASCE, Janeiro, 1990
- Schlösser, F. *Behaviour and design of soil nailing* In Symposium on recent developments in ground improvement techniques. Bangkok, 1982. p. 399-413
- Shen, C. K.; Kim, Y. S.; Bang, S.; Mitchell, J. F. *Centrifuge modeling of lateral earth support*. Journal of Geotechnical Engineering, Vol 108, No. GT9. ASCE, Setembro, 1982
- Stocker, M. F.; Korber, G. W.; Gässler, G. e Gudehus, G. *Soil Nailing*. In C. R. Int. Reinforcement des Sols, Paris, 1979. p. 469-474