

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Solo grampeado verde - análise numérica quanto a deformação de face

Petrucio José dos Santos Junior
Jundiaí, Brasil, petruciosobral@gmail.com

Monique Lacerda Sobral
Rio de Janeiro, Brasil, m.sobral@maccaferri.com

RESUMO: A solução em solo grampeado verde é uma variante da solução tradicional em solo grampeado que também envolve a análise do comportamento dos grampos e sua interação com o solo e sobre uma face flexível em malha metálica que apresenta um comportamento de membrana. Em alguns casos tem-se uma consideração equivocada quanto a contribuição dessa solução na estabilidade de uma massa de solo potencialmente instável, pois os elementos de face com um comportamento de membrana não apresentam uma condição ativa sobre o talude, havendo a necessidade de deslocamento significativos de uma porção de solo para que tal face possa ser ativada. Estudar como as malhas metálicas flexíveis se comportam, em paralelo ao comportamento dos grampos responsáveis pela estabilidade de uma massa instável de solo, é uma tarefa que pode ser simplificada uma vez conhecida a curva característica da malha metálica utilizada, sendo desse modo possível avaliar como se comporta a face de uma estrutura em solo grampeado verde quanto as eventuais deformações superficiais do talude.

PALAVRAS-CHAVE: solo grampeado verde, talude, geomanta, grampo, malha metálica.

ABSTRACT: The green soil nailing solution is a variant of the traditional soil nailing solution that also involves analyzing the behavior of the nails and their interaction with the soil and on a flexible metallic mesh face that exhibits elastic membrane behavior. In some cases, there is a mistaken consideration as to the contribution of this solution to the stability of a potentially unstable soil mass, as the face elements with a membrane behavior do not present an active condition on the slope, with the need for significant displacement of a portion of soil so that such a face can be activated. Studying how flexible metallic meshes behave, in parallel with the behavior of the nails responsible for the stability of an unstable soil mass, is a task that can be simplified once the characteristic curve of the metallic mesh used is known, thus making it possible to evaluate how comprises the face of a structure in green soil nailing for any surface deformations of the slope.

KEYWORDS: green soil nailing, soil slope, geomat, nail, metallic mesh.

1 Introdução

As técnicas de estabilização de taludes envolvem vários fatores, na maioria dos casos, influenciados pela geometria do talude, morfologia do terreno, parâmetros de resistência do solo, entre outros. Sendo assim, as discussões envolvendo qual é a melhor técnica para adotar em uma dada situação ou problema vêm a tona através do contexto geotécnico presente. A solução em solo grampeado é uma dessas técnicas que apresenta tais discussões. Essa solução está presente no dia a dia da engenharia de estabilização de taludes e sua utilização consagrada, em alguns momentos, chega a ir na contramão da engenharia de projetos. Isso ocorre porque as metodologias utilizadas em projeto ainda estão em desenvolvimento e as discussões aumentam ainda mais quando se introduz elementos que compõem a solução, como é o caso do elemento de face.

A solução em solo grampeado aborda na maioria dos casos o uso de face rígida e paramento parcialmente vertical em situação de corte em áreas urbanas, porém com o passar dos anos essa técnica ganhou variantes que culminaram em uma solução aplicável para taludes planejados ou não planejados, ou seja, taludes que necessitam de corte para ganho de área conforme previsto em projeto ou taludes naturais que necessitam de uma estabilização. Essa solução deixou de ser exclusiva para áreas urbanas ou para taludes verticais com



face rígida e ganhou aspectos que envolvem paramentos flexíveis inclinados, como é o caso dos solos grampeados verdes.

A solução em solo grampeado verde envolve uma análise criteriosa do comportamento dos grampos quanto a sua resistência e interação com o solo e quanto ao comportamento da face flexível. Tem-se em alguns casos, a não consideração da influência dessa face flexível com respeito a estabilidade ou tem-se uma consideração equivocada quanto a sua contribuição na estabilidade da massa de solo potencialmente instável. É sabido que elementos de face com um comportamento de membrana não apresentam uma condição ativa sobre o talude, havendo a necessidade de deslocamento de uma porção de solo para que tal face possa ser ativada. Desse modo, elementos de membranas, tais como malhas metálicas flexíveis, dispõem de uma lacuna quanto a um método de análise do comportamento de tais materiais aplicados a solos grampeados.

É fato que o próprio nome da solução já remete ao uso dos grampos como elementos responsáveis pela estabilização do talude, porém os elementos de face ganharam notoriedade com o uso de materiais flexíveis na face e até mesmo normas internacionais puseram em evidência a consideração ou não da contribuição da face ao desempenho do talude. Como é o caso da BS 8006-2:2011 que comenta o uso de 3 tipos de solução em solo grampeado, nas quais em uma delas o solo grampeado verde se enquadra.

Tendo em vista que existem métodos que possibilitam o cálculo do comportamento de elemento de membrana, é possível utilizar numericamente esses elementos em cálculos que remetem a atuação de uma pressão normal em sua superfície, como é o caso das soluções em solo grampeado verde, pois a área que abrange a região entre os grampos está sujeita a ação de uma pressão proveniente de uma potencial movimentação de solo.

Em resumo, tendo conhecimento do comportamento do solo, ou seja, como este pode se deslocar adotando o critério de análise adequado é possível, através de uma relação numérica, obter qual o comportamento do elemento de membrana, no caso malha metálica, sujeito a ação do solo.

Esse trabalho traz uma proposta de análise para solos grampeados verdes com o uso de malha metálica como elemento de face e abre a possibilidade de entender o comportamento real dessa solução em relação a solução tradicionalmente aceita com face rígida.

2 Solo grampeado verde

Trata-se de uma variante da solução tradicional em solo grampeado, na qual se admite o uso de elementos de face flexível, que possibilitam o crescimento da vegetação. Por essa solução remeter ao uso de espécies vegetais nativas da região, é utilizada quase sempre em um talude inclinado, a fim de favorecer o crescimento dessas espécies, algo que alivia os esforços atuantes no paramento frontal e possibilita o uso de um elemento de face flexível que apresente um comportamento de membrana.

É uma solução, em geral, econômica e utilizada em taludes que não necessitam de corte verticalizados, apenas regularização, ou seja, algo comum em taludes rodoviários, ferroviários e taludes que se encontram expostos em obras que necessitam de terraplenagem. A abordagem sugerida não é uma limitação do uso da solução, podendo ser aplicado em situações muito próximas a solução em solo grampeado tradicional, uma vez que seja levado em consideração os esforços sobre o paramento frontal em membrana elástica e a viabilidade no crescimento da vegetação em taludes mais íngremes.

A BS 8006-2:2011 faz referência a 3 tipos de solução em solo grampeado:

- *Soft facing*
- *Hard facing*
- *Flexible facing (Simple ou Complex)*

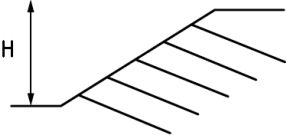
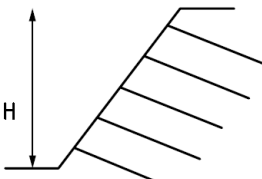
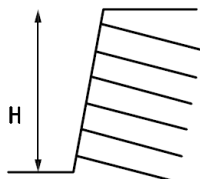
A solução em solo grampeado verde se enquadra no tipo *Flexible facing*, que admite duas possibilidades para categorizá-la. A tipo *Simple* na qual a transferência de carga para face se dá de forma passiva, ou seja, a malha é mobilizada apenas quando o solo sofre algum deslocamento, havendo assim o comportamento de membrana acionado. O tipo *Complex*, no qual as placas utilizadas nas extremidades dos grampos e posicionadas entre a porca e a malha mobilizam alguma carga para face, induzindo também uma ação da malha sobre o talude, ou seja, tem-se uma forma ativa de atuação do elemento de face. O tipo *Complex* não apenas restringe a face, mas também contribui na capacidade de carga do grampo. Recomenda-se que não apresente



inclinações superiores a 60 graus, pois as deformações devem ser controladas para que não haja ruptura interna da massa de solo entre os grampos.

Ainda segundo a BS 8006-2:2011 é possível fazer um pré-dimensionamento baseado na inclinação da face e determinar espaçamento entre os grampos e o tipo de elemento de face entre outras características. As considerações apresentadas na Tabela 1, remetem ao fato de haver mobilização de tensões diferentes ao inclinar a face do talude e conseqüentemente, havendo uma menor sollicitação no paramento frontal, tem-se uma condição na qual o solo grampeado verde pode se enquadrar.

Tabela 1. Dimensões típicas para solo grampeado baseadas na inclinação da face (BS 8006-2:2011)

Esquema dos taludes			
Ângulo do talude (com relação a horizontal)	Até 45 graus	45 a 60 graus	60 a 90 graus
Comprimento do grampo (Largura/Altura)	0,5 a 2,0	0,5 a 1,5	0,5 a 1,2
Espaçamento entre grampos			
Vertical	1,5m a 3,0m	1,0m a 2,0m	0,75m a 1,5m
Horizontal	1,5m a 3,0m	1,0m a 2,0m	0,5m a 2,0m
Face	Geralmente não estrutural, para controle de erosão, mas com placas ampliadas na cabeça dos grampos	Face tipicamente flexível, que desempenham um papel estrutural na manutenção da estabilidade	Face tipicamente rígida, que desempenham um papel estrutural na manutenção da estabilidade e permitem que altas forças sejam mobilizadas na conexão da face

3 Modelo numérico em MED

Para estudar o comportamento de um solo grampeado verde simulado através de uma malha metálica restringida em 4 pontos e sujeita a ação de uma força ortogonal, foi utilizado o software open-source YADE-DEM (Šmilauer et al., 2010) que aplica o método dos elementos discretos (MED). Foram utilizados os mesmos parâmetros definidos por Bertrand et al (2008) e que mais tarde foram empregados por Thoeni et al. (2011) na plataforma do software YADE-DEM. O passo de tempo crítico do modelo numérico proposto por Bertrand (2006) foi empregado.

Baseado no estudo numérico iniciado por Thoeni et al. (2011), que calibra a malha hexagonal de dupla torção em elementos discretos, foi criado um script na linguagem Python, que permite automatizar as tarefas e funcionalidades do YADE-DEM. Esse novo modelo foi calibrado e aferido segundo os resultados dos ensaios de punção baseados na UNI 11437/2012 (Santos Junior, 2018), que especifica painéis com dimensões de 3,00 m x 3,00 m, restringindo nos 4 lados (Figura 1). Para tornar o resultado mais próximo do real o pistão também foi modelado a partir de coordenadas específicas e vetorizado em frames que permitem sua interação com os outros elementos particulados do modelo (Figura 2).

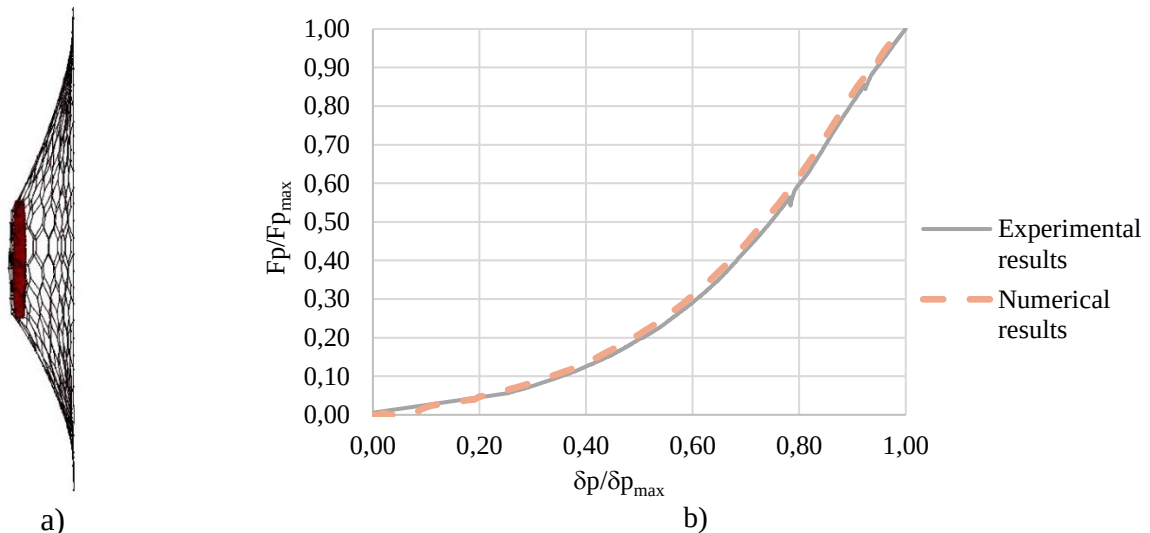


Figura 1. Modelo discretizado da malha metálica baseada no ensaio UNI 11437/2012; a) Simulação de teste de punção utilizando o modelo da malha metálica discretizada em MED; b) Comparação entre os resultados numéricos e experimentais através de uma curva normalizada.

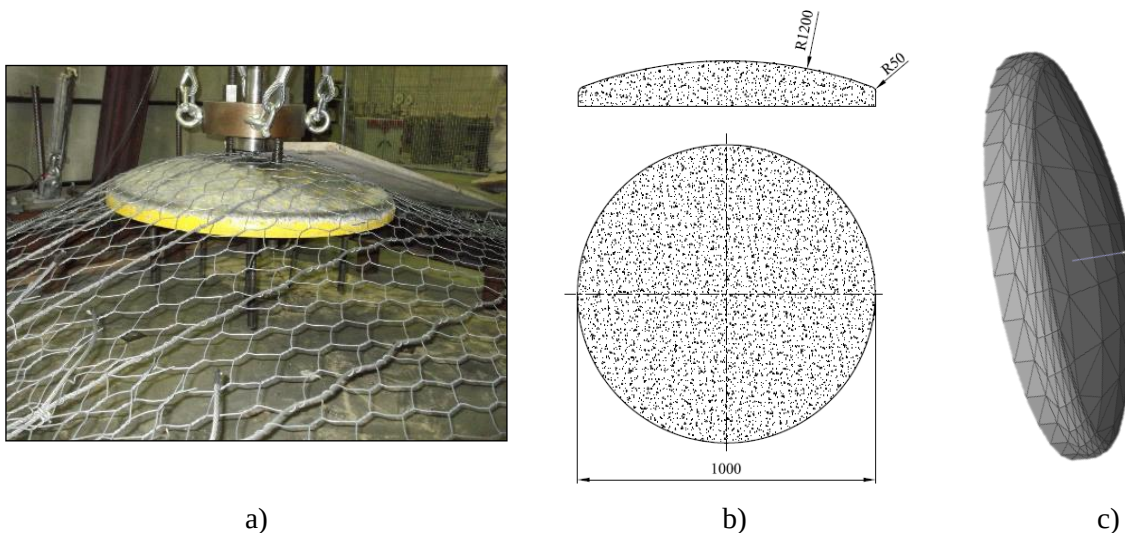


Figura 2. Pistão utilizado no ensaio de punção indicado na UNI 11437/2012; a) Ensaio em andamento; b) Esquema do pistão; c) Modelo do pistão gerado para ser utilizado no MED.

Após calibrar o modelo numérico com os resultados experimentais foi possível extrapolar a pesquisa utilizando painéis mais amplos com pontos de fixação que simulam as placas metálicas que se acoplam a cada grampo ancorado. Foram utilizados dois modelos de placas com dimensões variadas (Figura 3). Não foi possível observar diferenças significativas entre os resultados obtidos. Admite-se que os grampos se comportam como elementos com deslocamentos desprezíveis quando comparados com o elemento de face, a partir daí, é possível avaliar através de uma curva característica gerada pelo modelo numérico, se tais elementos de face são compatíveis com as deformações que o solo poderá sofrer. Na Figura 4a é possível ver o modelo numérico criado e também a curva de resistência do arame que foi utilizado no modelo. Baseado no modelo de arame estocástico distorcido proposto por Thoeni et al. (2011), decidiu-se adotar os valores de $\lambda_e=0,4$ e $\lambda_k=0,30$, obtendo-se uma boa aproximação das curvas experimentais do ensaio de punção (Figura 4b).

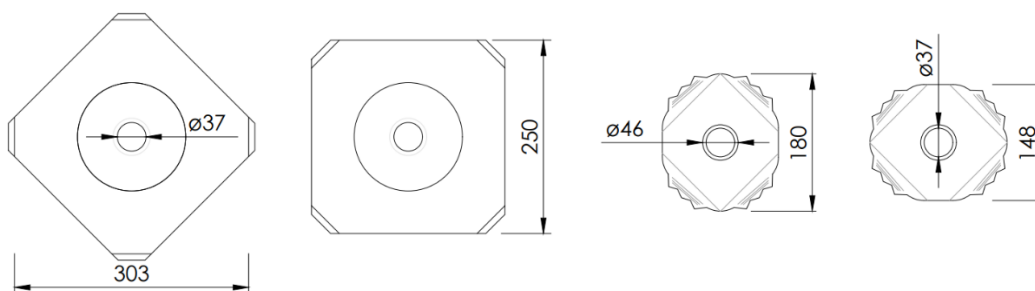
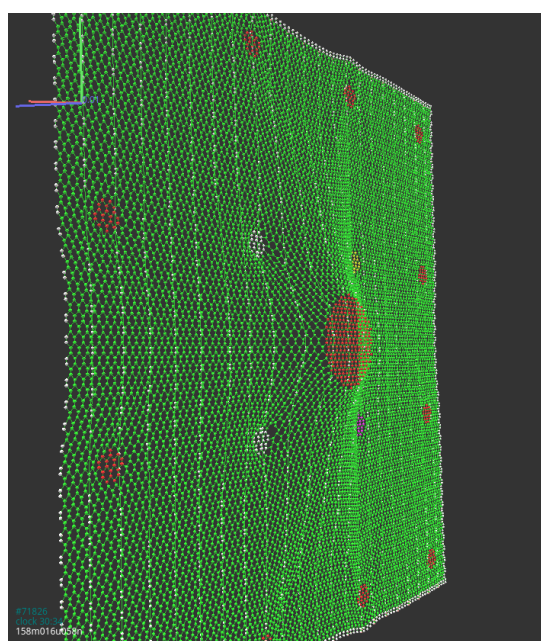
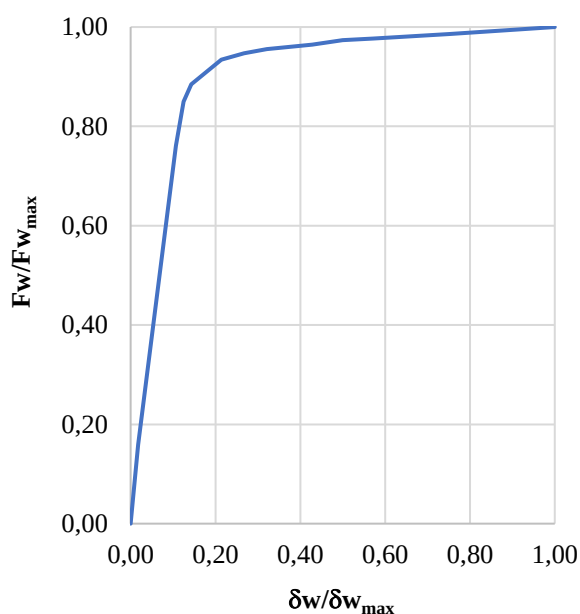


Figura 3. Modelos de placas de ancoragem que foram utilizados na simulação.



a)



b)

Figura 4. Simulação de teste de puncionamento com 4 pontos de fixação utilizando o modelo da malha metálica discretizada em MED; a) Simulação de teste de puncionamento utilizando pontos de fixação a cada 2 metros com o modelo da malha metálica discretizada em MED; b) Curva normalizada do arame (Santos Junior, 2018).

Uma vez que o ensaio sugerido pela norma UNI 11437/2012 representa uma forma padronizada para caracterizar a malha quanto a carga de puncionamento, é admissível utilizá-lo como referência para as análises. A partir dessa consideração é possível confrontar os resultados do modelo numérico no qual a malha se encontra restringida nos 4 lados (padrão UNI 11437/2012), com os resultados do modelo numérico com 4 pontos fixos representando as placas de ancoragem. Os resultados apresentados na Figura 5 mostram que é possível obter um fator mínimo de 2 para correlacionar ambos os modelos, tanto para carga quanto para o deslocamento para um modelo com grampos espaçados a cada 2,0 m.

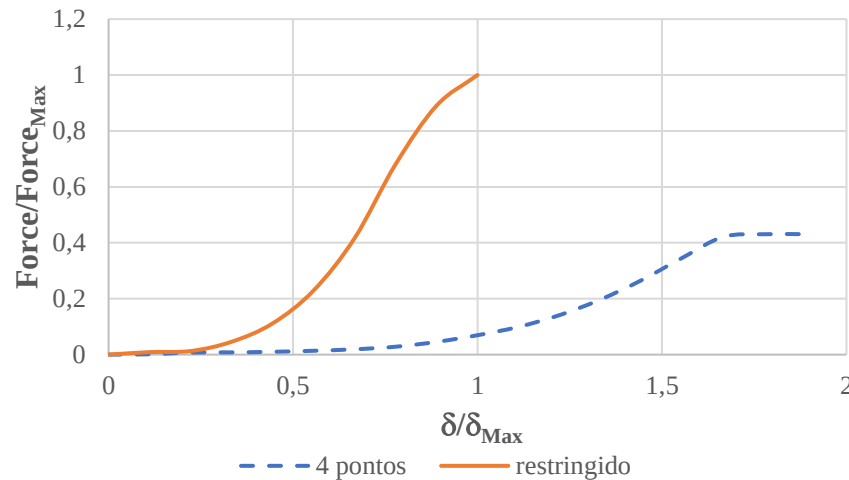


Figura 5. Gráfico normalizado que compara o modelo com 4 pontos fixos que representam as placas de ancoragem e o modelo com os 4 lados restringidos.

4 Análise dos resultados

Vários resultados podem ser obtidos das análises numéricas, uma vez que é possível extrair das análises de cada partícula discretizada no modelo resultados individuais como força, deslocamento entre outros. A fim de simplificar as análises foram extraídos gráficos normalizados que determinam a força em cada um dos 4 pontos que simulam a posição das placas e a força principal conferida pelo pistão. As análises foram feitas induzindo um deslocamento no pistão que ao entrar em contato com a malha gera várias forças de contato que estão orientadas nas 3 direções. Para as análises realizadas, determinou-se a somatória das forças na direção ortogonal ao plano da malha, assim como o deslocamento.

No modelo criado foi utilizado uma malha metálica que consiste na associação de cabos de aço à malha hexagonal de dupla torção, produzida com arames com liga GalMac® 4R (adicionalmente revestidos com polímero especialmente desenvolvido para obras de engenharia). O entrelaçamento longitudinal dos cabos de aço à malha de alta resistência de dupla torção, é realizado durante o processo de fabricação, formando assim um único produto. A Figura 6 mostra o modelo numérico em MED que ilustra a malha com o pistão se deslocando durante uma simulação numérica.

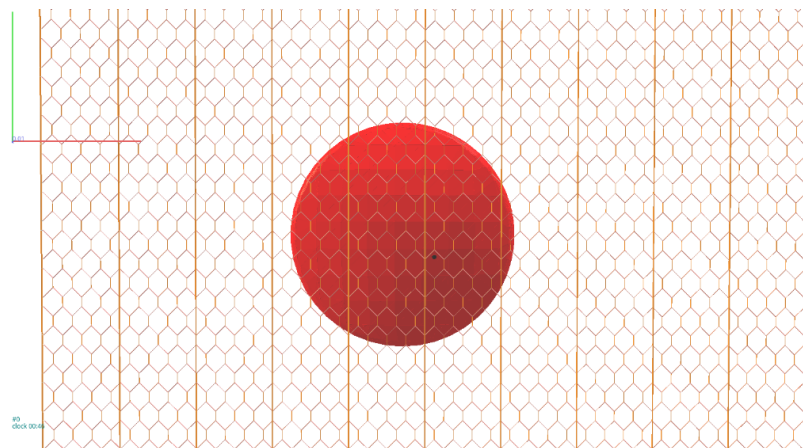


Figura 6. Modelo numérico criado para a malha metálica estudada.

Como resultado tem-se a obtenção de uma curva característica que possibilita avaliar como se relaciona o deslocamento da malha, como elemento de membrana, com a carga disponível. Essa é a analogia feita para



a face de um talude que apresenta um deslocamento e este deve ser restringido pela malha metálica (Figura 7).

A Figura 7 mostra que as forças se distribuem quase em igual intensidade para os 4 pontos fixos que representam as placas de ancoragem (Fpz1, Fpz2, Fpz3, Fpz4), que ao serem somadas representam a força de reação no pistão (Fn).

Uma análise que pode ser feita a partir dos resultados apresentados na Figura 7, é o fato de que as forças atuantes nos pontos que representam as placas de ancoragens são menores que a força principal atuante sobre a malha, aproximadamente 25% da força total aplicada. Algo evidente, uma vez que essas forças são obtidas através do equilíbrio de forças no sistema, porém nota-se que esse resultado apresenta intensidade significativa no momento da ruptura. Para mobilizar 10% da carga total da malha é necessário haver quase 50% de deslocamento normal ao plano.

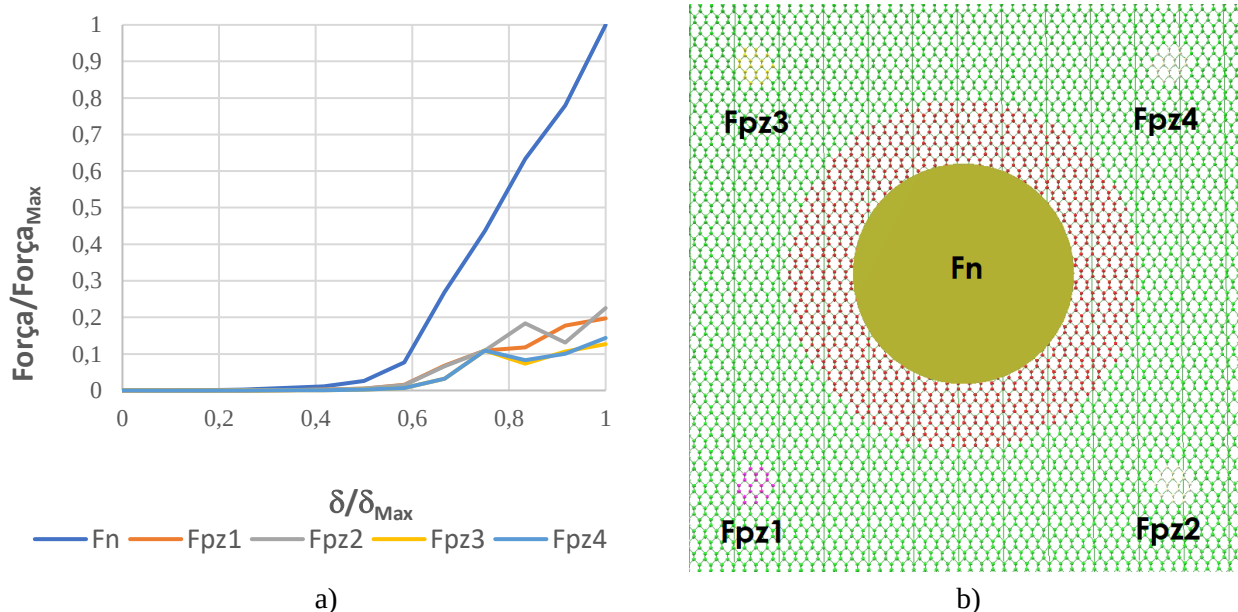


Figura 7. Resultados da simulação do modelo em malha metálica utilizando o MED; a) Curva normalizada da simulação numérica, Força/Deslocamento, medidos a partir da reação do pistão e dos 4 pontos fixos que representam as placas de ancoragem nos grampos; b) Vista posterior do modelo do painel em malha metálica com placas de ancoragem espaçadas a cada 2,0 m.

5 Conclusão

Os resultados obtidos através das análises numéricas simplificam o entendimento do comportamento das malhas metálicas em taludes e possibilitam uma correlação direta com os ensaios experimentais de caracterização desses materiais. Obtém-se uma forma simples de analisar elementos de face aplicados a taludes em solo grampeado verde, além de possibilitar avaliar, também de forma simples, se as deformações necessárias para mobilizar a carga na face são compatíveis com as do solo. Evidencia-se através dos resultados obtidos que a malha metálica transfere baixa carga para os grampos e para que haja uma carga significativa atuantes sobre as placas de ancoragem é necessário que haja um deslocamento substancial, algo que instabilizaria o talude e também a massa de solo responsável pela ancoragem dos grampos, ou seja, deve-se trabalhar dentro de limites aceitáveis de deslocamento para o solo. Os estudos precisam ser ampliados para variações de espaçamento entre grampos, diferentes tipos de carregamento sobre a malha e tipos distintos de malha metálica, mas levando em conta que o comportamento de membrana é aceito para as malhas metálicas uma correlação direta pode ser obtida também através dos modelos numéricos já criados. Essa ação serve como estímulo e referência para a extensão desse estudo e para trabalhos futuros.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- British Standards Institution – BS 8006-2 (2011) Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
- Bertrand, D. (2006) Modélisation du comportement mécanique d'une structure cellulaire soumise à une sollicitation dynamique localisée, Application aux structures de protection contre les éboulements rocheux, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 197p.
- Santos Junior, P.J. (2018) Gabiões e estruturas de arrimo: análise teórico-numérico-experimental do comportamento mecânico - Campinas, SP: [s.n.], Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.
- Šmilauer, V., Catalano, E., Chareyre, B., Dorofeenko, S., Duriez, J., Gladky, A., Kozicki, J., Modenese, C., Scholtès, L., Sibille, L., Stránský, J., Thoeni, K. (2010) Yade Documentation. The Yade Project. (<http://yade-dem.org/doc/>).
- Thoeni, K., Lambert, C., Giacomini, A., Sloan, S. W. (2011) Discrete Modelling of a Rockfall protective system, II International Conference on Particle-based Methods-Fundamentals and Applications, PARTICLES 2011, Barcelona, Spain.
- UNI 11437 (2012) Rockfall Protective Measures - Tests On Meshes For Slopes Coverage.