

ESTUDO DA INTERACÇÃO MECÂNICA ENTRE REDES METÁLICAS PREGADAS E TALUDES ROCHOSOS

MECHANICAL INTERACTION BETWEEN NAILED METALLIC MESHES AND ROCK SLOPES

Cardoso, Ana Isabel Soares, *Estradas de Portugal, E.P.E., Coimbra, Portugal,*
ana.cardoso@estradasdeportugal.pt

Quintanilha de Menezes, José Eduardo, *FEUP, Porto, Portugal, menezes@fe.up.pt*

RESUMO

Nos últimos anos apareceram no mercado Português as redes de arames de aço de alta resistência que, associadas a pregagens, promovem a estabilização de taludes rochosos. Estas soluções de estabilização são designadas de revestimentos pregados flexíveis. O seu dimensionamento corrente consiste apenas na determinação dos parâmetros mecânicos e geométricos das pregagens, desprezando-se a contribuição do revestimento para a estabilidade da estrutura rochosa. Pretende-se, aqui, apresentar uma metodologia para quantificar essa contribuição. Para tal, foi feita uma caracterização mecânica da rede, foram consideradas estruturas rochosas tridimensionais simples e determinou-se, analítica e numericamente, o factor de segurança que lhes estava associado para três estados diferentes: sem suporte, com pregagens e com revestimento pregado.

ABSTRACT

In the latest few years, high strength steel wire meshes emerged on the Portuguese market, thus inducing a rapidly growing interest in the use of such wire meshes, duly nailed, in order to achieve rock slope stabilisation. State of the art design of rock slope stabilisation solutions using nailed liners is based mostly on mechanical factors that involve geometric parameters of applied nails. Hence, the contribution of liners to rock structure stabilisation being quantitatively ignored, as a rule, the present study aims at quantifying liner contribution to the increase of stability in rock slopes. The capability of mechanical modelling of a metallic mesh was achieved with regard to a number of laboratory results. Simple three-dimensional rock structures have been considered and the respective safety factors were determined, both analytically and numerically, for three different stages: without support, nailed and with nailed liner.

1. INTRODUÇÃO

As redes de arame e cabos de aço de elevada resistência situam-se no grupo de soluções de estabilização designadas por revestimentos pregados. Um revestimento pregado, tal como o nome indica, é constituído por uma estrutura que reveste a face do talude, estando associada a elementos resistentes unidimensionais introduzidos no maciço – as pregagens.

Segundo o anteprojecto de norma europeia *Soil Nailing* [3] o revestimento associado aos elementos pregados define-se como a cobertura da face exposta do maciço, cumprindo funções de estabilização entre os elementos pregados e/ou de protecção contra a erosão, tendo em conta preocupações de ordem estética e paisagística.

Ainda no mesmo documento, distinguem-se vários tipos de revestimento: rígido, flexível e brando, de acordo com a deformação admitida pela estrutura.

As redes metálicas são exemplos de revestimentos flexíveis. Recebem e aplicam impulsos ao terreno de forma contínua. Têm uma função estabilizadora, suportando o material que se destaca entre as pregagens. O seu comportamento depende do espaçamento entre pregagens, visto que existe uma interacção entre estes elementos. São estruturas de suporte ligeiras e flexíveis, adaptam-se a superfícies irregulares, confinam e evitam a progressiva desagregação superficial do maciço.

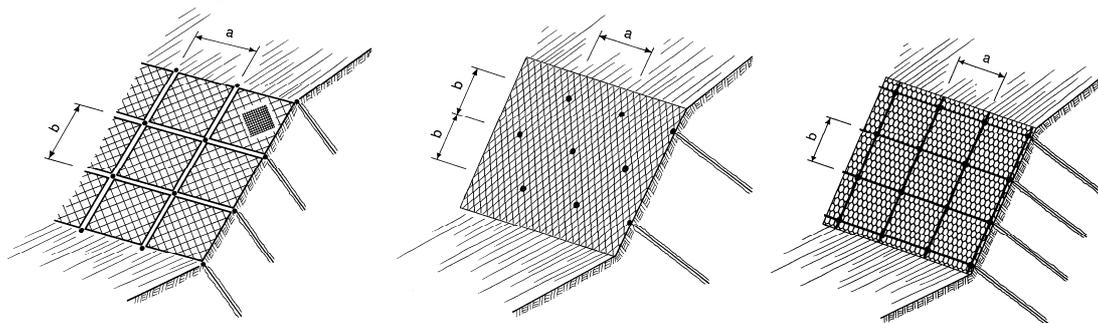


Figura 1 – Exemplos de revestimentos pregados do tipo flexível [3]

Existem vários tipos de redes metálicas no mercado. As redes convencionais do tipo hexagonais de dupla ou tripla torção são constituídas por arame de aço com resistência à tracção entre 400 e 700 N/mm². Existem ainda redes de arame de aço com elevada resistência à tracção (superior a 1200 N/mm²) e que, por terem maior capacidade de suporte, admitem a combinação com pregagens activas.

As redes de arame de aço são membranas flexíveis usadas, nos últimos 10 a 12 anos, como suporte superficial em estabilização de taludes. Inicialmente combinada com pregagens passivas a sua aplicação foi alargada, a partir de 1996, associando-se a pregagens activas [9].

2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA REDE DE AÇO

A rede de aço em estudo é constituída por arame de aço com 3 mm de diâmetro. Através de torção simples o arame é disposto em forma de losango cujas diagonais medem 143 mm e 83 mm, resultando num diâmetro interno de 65 mm* [8].

A rede de arame de aço é um material ortotrópico de comportamento elástico linear. A ortotropia aparece devido à geometria da malha, sendo as direcções de ortotropia definidas pelos eixos das diagonais dos losangos e pela direcção normal ao plano da rede.

A direcção de maior rigidez da rede é a direcção do rolo e dispõe-se segundo a direcção do desenvolvimento vertical do talude. A direcção de menor rigidez dispõe-se, portanto, segundo a direcção do desenvolvimento horizontal do talude.

Fresno e Munõz [5] e Torres Vila [9] realizaram alguns ensaios laboratoriais que permitem a caracterização mecânica da rede de arame de aço:

- ensaios de tracção directa segundo o plano da rede, permitindo que a amostra se deformasse apenas na direcção da diagonal maior (direcção y), impedindo a deformação segundo a outra direcção (direcção x);

* Sistema TECCO® desenvolvido por Fatzter AG, Geobrugg Protection Systems, Suíça

- ensaios de tracção directa segundo a direcção da diagonal menor (direcção x), impedindo a deformação da amostra na direcção y;
- ensaios de punçoamento em que a amostra de rede é impedida de se deformar ao longo do seu perímetro, sendo aplicada uma carga concentrada no seu centro.

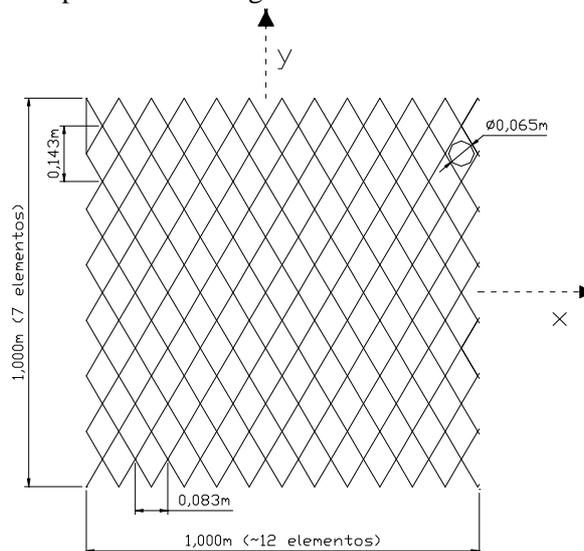


Figura 2 – Geometria da rede de arame de aço em estudo [2]

Obteve-se a matriz rigidez do material através dos resultados destes ensaios laboratoriais e partindo da Lei de Hooke generalizada. De forma a simplificar a Lei de Hooke assumiram-se previamente algumas hipóteses simplificativas:

- uma espessura equivalente do material;
- considerou-se a rede de aço como uma membrana ou placa fina, onde as tensões normais ao plano da rede e as distorções nos planos xz e yz são nulas, o que permite fazer uma análise bidimensional, dado que se está perante um caso de estado plano de tensão.

Os valores dos elementos da matriz rigidez, assim obtidos, foram depois confirmados através da simulação, no programa $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ [†], das condições fronteira e de carregamento dos ensaios laboratoriais, assumindo grandes deformações e grandes deslocamentos. O quadro 1 mostra que os deslocamentos obtidos pela simulação numérica dos ensaios se aproximam bastante dos valores obtidos em laboratório:

Quadro 1 – Comparação dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e na modelação no $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ para a rede de arame de aço com 3 mm de diâmetro [2]

Diâmetro do arame (mm)		f=3	
Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório e na modelação no $\text{FLAC}^{3\text{D}}$		Resultados obtidos nos ensaios de laboratório [9]	Resultados obtidos nos modelos do $\text{FLAC}^{3\text{D}}$
Ensaio de tracção na direcção da diagonal maior (y)	Carga na rotura (kN/m) [#]	151,46	151,50
	Extensão na rotura (mm/m)	83,80	84,28
Ensaio de tracção na direcção da diagonal menor (x)	Carga na rotura (kN/m) [#]	68,86	69,00
	Extensão na rotura (mm/m)	340,73	342,9
Ensaio de punçoamento	Carga na rotura (kN)	67,34	67,00
	Deslocamento ao centro (mm)	202,48	202,4

[#] O material modelado no $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ não tem um limite de elasticidade por limitação do programa, pelo que se simularam as condições de carregamento obtidas na rotura nos ensaios de laboratório

[†] *Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions* - versão 2.1, um programa de cálculo de diferenças finitas.

Obteve-se assim a lei constitutiva de um material ortotrópico de comportamento elástico linear, válida quando as direcções de referência são as direcções de ortotropia do material:

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{s}_x \\ \mathbf{s}_y \\ \mathbf{t}_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,02 \times 10^6 & 2,25 \times 10^6 & 0 \\ 2,25 \times 10^6 & 9,12 \times 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 7,75 \times 10^{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{e}_x \\ \mathbf{e}_y \\ \mathbf{g}_{xy} \end{Bmatrix} \quad [\text{kPa}] \quad [1]$$

A matriz rigidez, assim obtida, foi usada nos modelos numéricos de forma a simular o comportamento de um revestimento flexível quando aplicado na estabilização de taludes.

3. DETERMINAÇÃO DO FACTOR DE SEGURANÇA NUMA ANÁLISE NUMÉRICA

O Factor de Segurança (FS) é um conceito intrínseco e muito frequente em análises de estabilidade de taludes. Define-se FS como sendo a relação entre a resistência ao corte real do material e a resistência ao corte necessária para atingir um estado de rotura - Bishop (1955), in [4].

Dado que FS é definido como um factor de redução da resistência ao corte, uma forma de computar o seu valor usando um programa de diferenças finitas (FLAC^{3D}), consistirá em reduzir gradualmente os parâmetros de resistência ao corte do material até ocorrer o colapso. O valor do FS será obtido pela relação entre os valores dos parâmetros de resistência iniciais e os valores dos parâmetros de resistência que originam a rotura [4]. No sentido de avaliar o nível de segurança nas análises numéricas efectuadas para estruturas rochosas tridimensionais, associadas ou não a elementos de suporte, utilizou-se este conceito de FS.

Foram feitos vários cálculos numéricos para diferentes valores de FS, a que corresponde um ajustamento dos valores da coesão e do ângulo de atrito das interfaces que modelam as descontinuidades do maciço, de acordo com as seguintes equações:

$$c = \frac{c_{inicial}}{FS} \quad [2]$$

$$f = \arctan \left(\frac{\tan f_{inicial}}{FS} \right) \quad [3]$$

As expressões [2] e [3] correspondem à seguinte definição de Factor de Segurança:

$$FS = \frac{\tan f_{inicial}}{\tan f} = \frac{c_{inicial}}{c} \quad [4]$$

O valor de FS numérico fica definido a partir do momento em que não é possível a redução dos valores dos parâmetros de resistência ao corte da superfície de rotura (coesão e ângulo de atrito) sem que o sistema revele instabilidade.

A dificuldade em averiguar qual o valor do FS num cálculo numérico, ou seja, quando o sistema deixa de ser estável, reside na interpretação dos resultados. Os vários indicadores que levam a conclusões sobre o equilíbrio do sistema são, segundo Itasca [7] e de uma forma genérica, os seguintes:

1. a convergência do cálculo numérico - quando o modelo numérico atinge a rotura, ou seja não se encontra em equilíbrio, o cálculo não converge.
2. a convergência do historial da velocidade (deslocamentos/n.º de ciclos de cálculo) para zero e a convergência assintótica do historial dos deslocamentos - quando o cálculo

converge é ainda necessário analisar outros indícios que revelem se o sistema está ou não em equilíbrio.

3. a análise da magnitude da velocidade relacionada com o valor dos deslocamentos dará como indicação o aumento dos deslocamentos num determinado número de ciclos de cálculo.

4. APLICAÇÃO DA REDE PREGADA A ESTRUTURAS ROCHOSAS SIMPLES

Idealizaram-se dois taludes com diferentes estruturas rochosas tridimensionais:

- A. estrutura do tipo cunha em que um bloco em forma de tetraedro desliza ao longo de um único plano inclinado;
- B. estrutura em camadas inclinadas com blocos paralelepípedicos com rotura por deslizamento ou toppling.

As figuras 3 e 4 mostram o aspecto da geometria dos modelos adoptados:

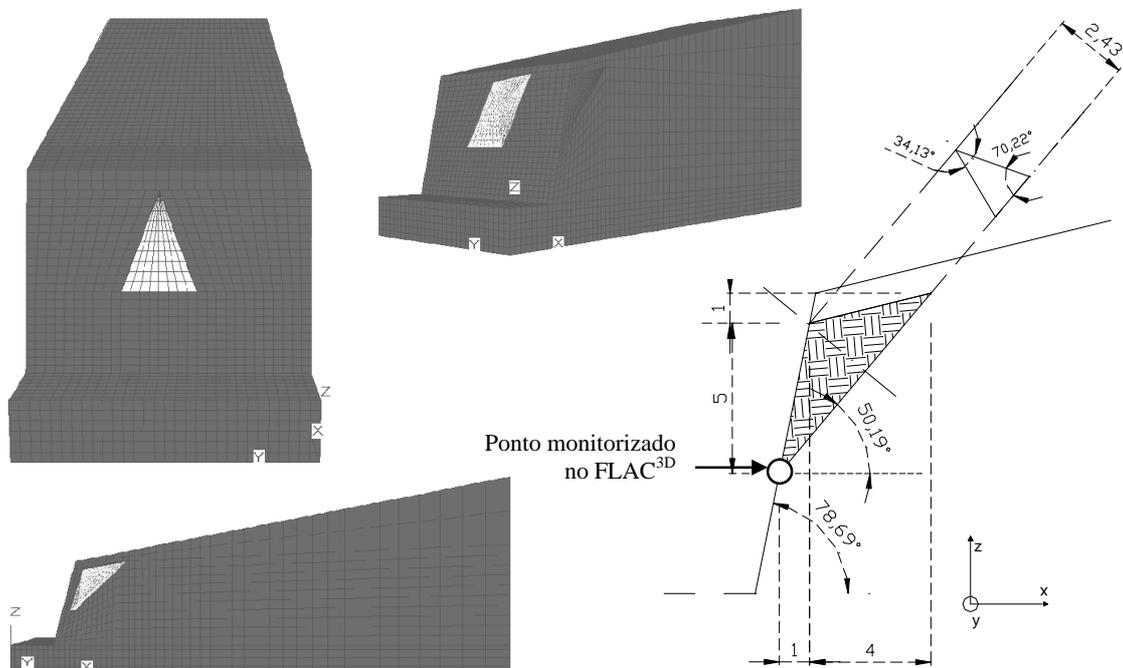


Figura 3 – Aspecto do modelo A

O cálculo numérico para cada um dos modelos foi realizado em 3 fases (usando o $FLAC^{3D}$ ‡) que diferem na aplicação e capacidade dos elementos de suporte aplicados:

1. Maciço rochoso sem suporte;
2. Maciço rochoso com pregagens pré-tensionadas §;
3. Maciço rochoso com o sistema de rede de aço (caracterizado no ponto 2) e as mesmas pregagens pré-tensionadas usadas na fase 2.

‡ O $FLAC^{3D}$, apesar de não estar vocacionado para a modelação de estruturas complexas de maciços rochosos compartimentados, permite a modelação de estruturas tridimensionais simples e respectivo cálculo.

§ As pregagens foram modeladas no $FLAC^{3D}$ por elementos tipo cabo (elementos estruturais lineares com comportamento elástico perfeitamente plástico) que se caracterizam por: pré-tensionamento igual a 37kN – valor determinado pela método analítico do Equilíbrio Limite de forma a obter um FS próximo de 1,5; varão de aço com 32mm de diâmetro; 76mm de diâmetro de furação; inclinadas de 20° com a horizontal; dispostas em quincôncio; com 3m e 4m de comprimento para o modelo A e B, respectivamente.

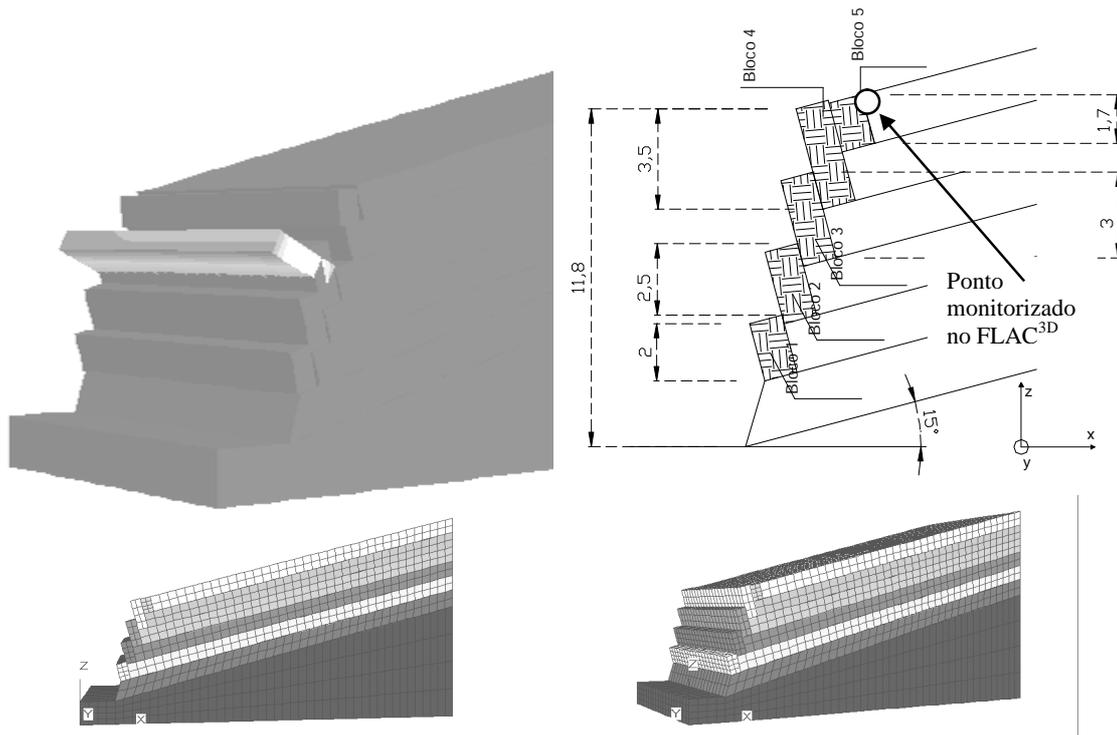


Figura 4 – Aspecto do modelo B

Para cada um dos modelos e para cada uma das fases do cálculo numérico, usando o programa FLAC^{3D}, obteve-se o valor numérico do FS tal como descrito no ponto 3.

Adicionalmente determinou-se o FS analítico pelo método do Equilíbrio Limite, para as mesmas condições geométricas e geotécnicas dos modelos numéricos. Ou seja, comparando as forças estabilizadoras com as forças instabilizadoras que favorecem o deslizamento de cada bloco, no caso de rotura planar por deslizamento, ou, comparando o momento estabilizador com o momento instabilizador, no caso de rotura por basculamento (*toppling*), determinou-se o valor do FS, para cada uma das fases 1 e 2 nos modelos A e B [6].

Compararam-se então os resultados numéricos com os resultados obtidos analiticamente, obtendo-se o quadro 2, que reflecte uma boa aproximação dos resultados obtidos analítica e numericamente (excepto para o modelo B com pregagens cuja diferença se julga dever-se ao facto do FS analítico ser um FS global, enquanto que o FS numérico se refere ao bloco com maior tendência para instabilizar) e o aumento significativo do nível de segurança quando se introduz o revestimento flexível.

Quadro 2 – Resumo dos valores obtidos para os Factores de Segurança obtidos nas várias fases do cálculo analítico e numérico para os modelos A e B.

Modelo	Factores de Segurança				
	Sem suporte		Com pregagens pré-tensionadas		Com pregagens pré-tensionadas associadas a rede
	Cálculo analítico	Cálculo numérico	Cálculo analítico	Cálculo numérico	
A	0,89	0,84	1,50	1,38	2,15
B	0,66	0,67	1,50	0,72	2,31

Apresentam-se alguns gráficos que resumem a variação dos deslocamentos para os pontos monitorizados ao longo dos cálculos numéricos (ver Figuras 3 e 4), a variação da velocidade máxima de deslocamento e a variação da força máxima de tracção nas pregagens, para diferentes valores de FS obtidos numericamente.

A interpretação destes gráficos deverá ter em conta que, segundo o conceito de FS anteriormente introduzido no ponto 2, o aumento do valor de FS significa que as propriedades resistentes das descontinuidades diminuem, reflectindo a aproximação da situação de instabilidade do talude

Gráfico 1 – Variação dos deslocamentos verticais e horizontais para o modelo A

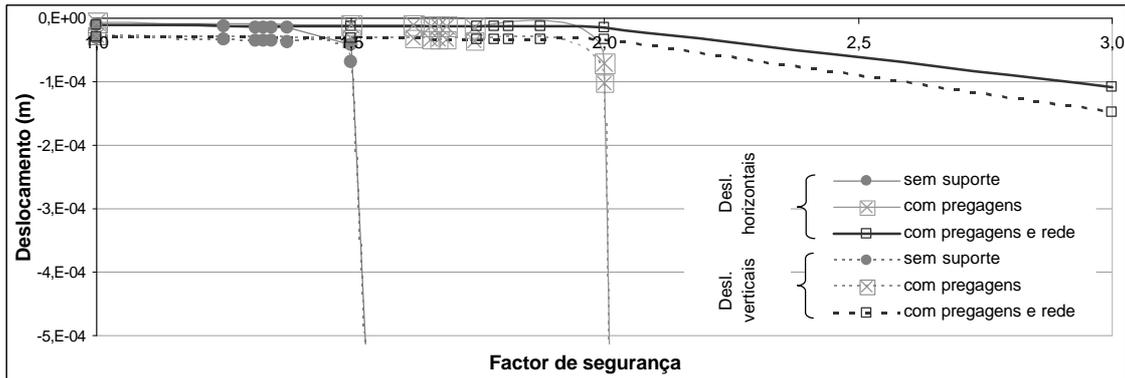


Gráfico 2 - Variação da força máxima de tracção nas pregagens no modelo numérico A

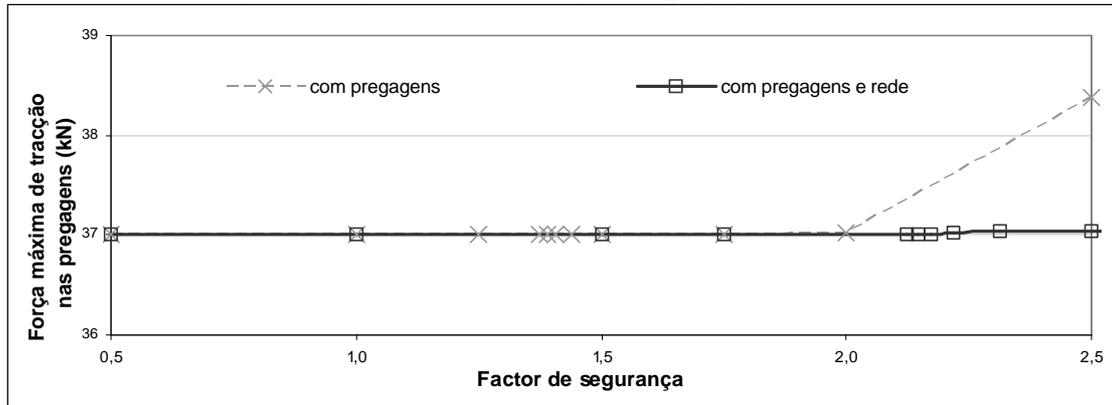


Gráfico 3 - Variação da velocidade máxima dos elementos do meio contínuo no modelo numérico A

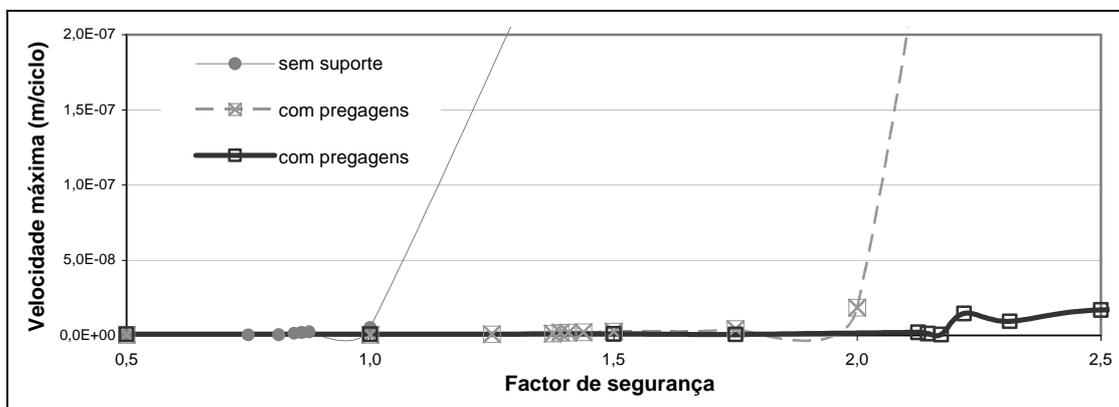


Gráfico 4 – Variação dos deslocamentos horizontais para o bloco situado no topo do talude no modelo B

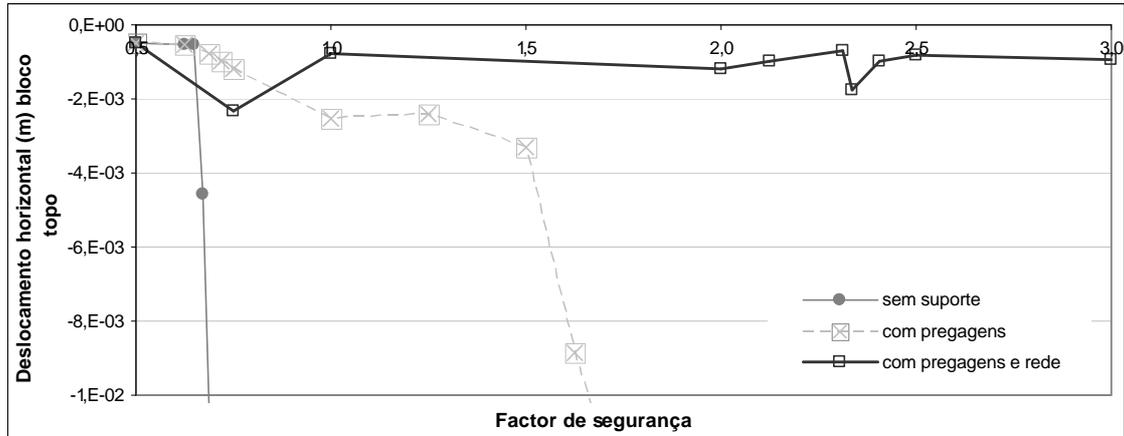


Gráfico 5 – Variação dos deslocamentos verticais para o bloco situado no topo do talude no modelo B

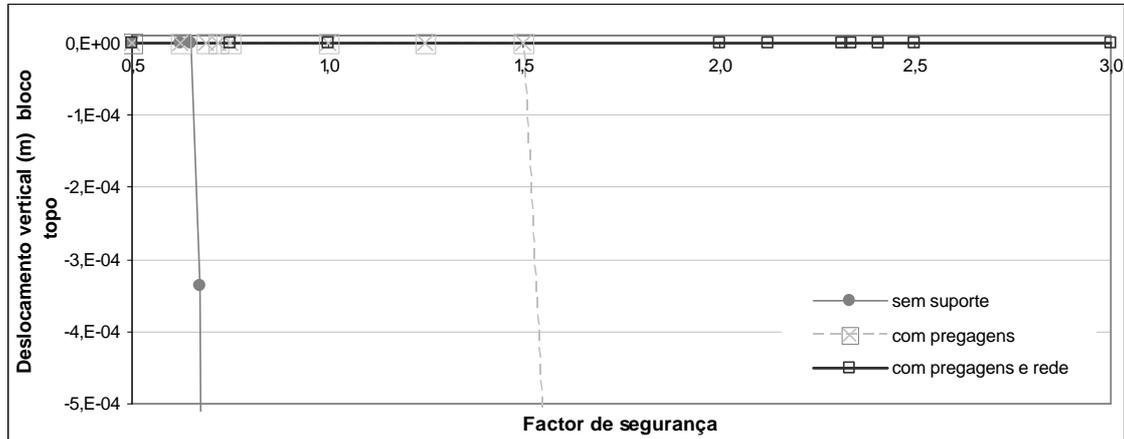


Gráfico 6 - Variação da força máxima de tracção nas pregagens para diferentes valores do Factor de Segurança no modelo numérico B

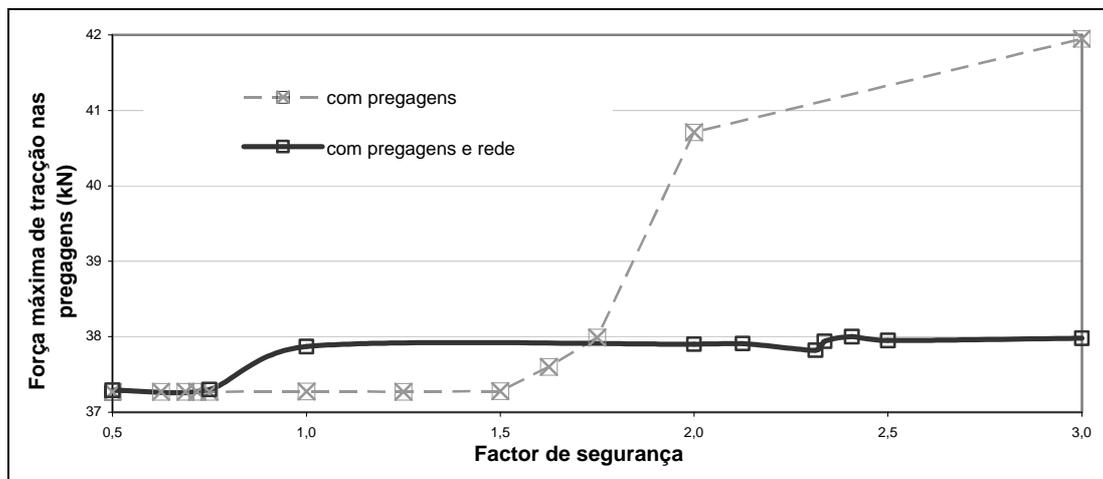
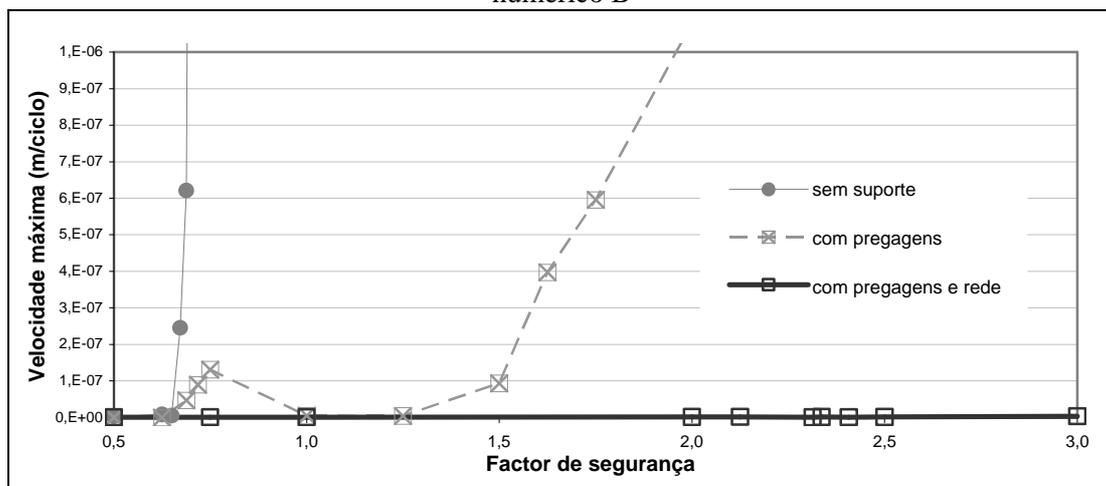


Gráfico 7 - Variação da velocidade máxima dos elementos do meio contínuo no modelo numérico B



5. CONCLUSÕES

Para os dois modelos considerados neste estudo tiram-se algumas conclusões já esperadas [1]:

- para Factores de Segurança cada vez maiores, ou seja, para parâmetros de resistência ao corte (c e ϕ) cada vez menores, o valor dos deslocamentos no maciço aumenta;
- a introdução de pregagens como elementos estruturais de suporte tem um contributo benéfico, reflectindo-se na diminuição dos deslocamentos sofridos pelos blocos;
- comparando com as curvas das fases de cálculo anteriores, a introdução do sistema de suporte composto por rede de aço e pregagens, mostra a capacidade de diminuir os deslocamentos do maciço para o mesmo factor de segurança a partir do momento em que se denota desequilíbrio dos blocos.

Conclui-se ainda que:

- Os valores de FS obtidos no cálculo analítico e no cálculo numérico aproximam-se bastante, excepto no modelo B para a situação do talude estabilizado com pregagens;
- No caso do modelo A a introdução das pregagens pré-tensionadas no modelo numérico reflecte o aumento de segurança esperado e obtido no cálculo analítico. No modelo B isso não acontece visto que, o FS obtido analiticamente representa um FS global, enquanto que o FS numérico se refere ao bloco com maior tendência para instabilizar. Ou seja, analiticamente, o talude tem um FS=1,5 e, portanto, até este valor de FS o maciço não sofre uma instabilização generalizada. O primeiro bloco a instabilizar neste modelo é o do topo e, mesmo sem originar a desarticulação do maciço, numericamente os vectores da força de desequilíbrio concentram-se neste bloco para FS>0,72, originando, assim, um FS numérico consideravelmente mais baixo que o analítico;
- A introdução da rede de aço nos cálculos numéricos, efectuados para diferentes condições de estabilidade e de compartimentação de maciços rochosos, resultou sempre num aumento da segurança e na diminuição dos deslocamentos em relação à estabilização apenas com pregagens. Para os dois modelos constatou-se que o aumento da segurança é muito variável quantificando-se da seguinte forma: 56% e 208%, para os modelos A e B, respectivamente;
- Verificou-se, ainda, uma ligeira diminuição dos esforços de tracção instalados nas pregagens com a introdução da rede metálica no sistema de suporte.

Os resultados obtidos são indicativos da contribuição da rede metálica (quase sempre desprezada na prática corrente) na melhoria da estabilidade dos taludes rochosos. A quantificação do benefício promovido pela consideração da rede foi muito variável, mas claramente positiva [1].

Além de promover a estabilidade dos taludes, a rede melhora o comportamento da estrutura de suporte, na medida em que permite a redistribuição de tensões, aumentando a capacidade de carga do sistema, e confere uma maior independência da malha de pregagens em relação à compartimentação do maciço rochoso. A contemplação da rede metálica, ou de qualquer outro tipo de revestimento, no dimensionamento dos revestimentos pregados, permitirá o aumento do espaçamento da malha de pregagens e, conseqüentemente, uma diminuição dos custos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cardoso, A. I. S. (2005) *Estabilização de taludes rochosos com redes metálicas pré-tensionadas*. Tese de Mestrado. FCTUC/FEUP.
- [2] Cardoso, A. I. S. & Quintanilha, J. E. (2004) Numerical modeling of nailed wire and cable metallic meshes for rock slope stabilization. EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium.
- [3] CEN Technical Committee 288 – working group 9 (2000) *Draft European Standard. Execution of special geotechnical work – soil nailing*
<http://www.personal.dundee.ac.uk/~amcjones/cen/fd/contents.htm>
- [4] Dawson, E. M., Roth, W. H. & Drescher, A. (1999) *Slope stability analysis by strengthreduction*. Géotechnique 49, No. 6: 835-840
- [5] Fresno, C.D. & Munõz, B.F. (2001) *Las membranas flexibles como elemento de soporte para la estabilización de taludes e laderas*. XVII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos, Murcia. <http://www.unizar.es/aeipro/finder/contenido.htm>
- [6] Hoek, E. & Bray, J. (1999) *Rock Slope Engineering*. E & F. N. Spon
- [7] Itasca.(2002). *FLAC^{3D}. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Version 2.1*. Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis.
- [8] Ruegger R., Flum D. & Haller B. (2000) *High-performance steel wire mesh for surface protection in combination with nails and anchors*. Contribution to the 2nd Colloquium Construction in soil and rock. Technical Academy of Esslingen.
- [9] Torres Vila, J. A. (2002) *Flexible membranes made of high strength steel wire in the slope stabilization technology*. In C. Dinis da Gama & L. Ribeiro e Sousa (ed.), Proc. ISRM-International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions Eurock 2002:111-120. Funchal.