

Interacção solo-geogrelhas - uma análise experimental através de um ensaio de arranque

M. A. Ladeira e M. L. Lopes

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Sumário

Descrever-se-á o equipamento, as amostras e os procedimentos de ensaio de arranque com geogrelhas em solos granulares. A influência de parâmetros, como a velocidade de ensaio e a tensão de confinamento na força de arranque de uma geogrelha envolvida por uma areia será avaliada.

Abstract

Testing equipment, specimen preparation and testing procedures are presented for pull-out tests for geogrids in granular soils. The influence of the displacement-rate and the confining pressure on pull-out-displacement response of a geogrid embedded in sand are evaluated.

INTRODUÇÃO

A grande variedade de geossintéticos existentes no mercado nacional e internacional associada à crescente aplicação destes materiais em obras geotécnicas tem vindo a impôr a necessidade de realizar ensaios que permitam aferir a adequação de um determinado geossintético a uma dada aplicação.

Assim, por exemplo, a selecção do geossintético a utilizar no reforço de um dado muro ou talude deveria estar associada à realização de ensaios do material confinado pelo solo por forma a que aspectos do comportamento conjunto solo-geossintético, tais como: o comportamento tensão-deformação-razão de deformação e a resposta ao arranque (fenómeno intimamente associado à transferência de tensões do solo para os reforços), pudessem ser analisados.

A normalização de ensaios que permitam definir as propriedades mecânicas dos geossintéticos quando confinados por solo é inexistente, nomeadamente, no que se refere aos ensaios de arranque. Esta circunstância é, em grande parte, justificada pelo elevado número de factores que influenciam as propriedades mecânicas da interface

solo-geossintético o que , naturalmente, dificulta a existência de resultados de ensaios comparáveis.

Com efeito, existe uma grande dispersão nos resultados publicados de ensaios de arranque. Estas diferenças resultam da utilização de diferentes tipos de equipamento, e consequentemente, dos efeitos de fronteira associados a cada um, de diferentes procedimentos de ensaio, de diferentes esquemas de colocação e compactação do solo, etc. (Juran *et al.*, 1988).

A crescente utilização de geossintéticos no reforço de solos carece do desenvolvimento de métodos normalizados de avaliação das características mecânicas dos geossintéticos confinados por solo e das propriedades das interfaces entre os dois materiais. É, pois, necessário desenvolver o equipamento adequado, estabelecer procedimentos de ensaio fiáveis e desenvolver esquemas de interpretação de resultados apropriados.

Com o objectivo principal de lançar algum esclarecimento acerca dos fenómenos envolvidos no comportamento mecânico das interfaces solo-geossintéticos e da influência neste de alguns factores físicos, geométricos e mecânicos desenvolveu-se no Laboratório de Geotecnia da FEUP uma caixa de arranque de grandes dimensões.

É analisando alguns dos resultados obtidos em ensaios de arranque realizados com este equipamento em geogrelhas confinadas por um solo arenoso que se procurará avaliar, neste trabalho, a influência da velocidade de arranque e da tensão de confinamento na resistência da interface solo-geogrelha.

TIPOS DE ENSAIOS MAIS ADEQUADOS Á AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS CARACTERIZADORES DA INTERACÇÃO SOLO - GEOSSINTÉTICOS

Quando se aplicam geotêxteis no reforço de solos granulares o mecanismo fundamental de interacção solo-inclusões consiste na mobilização da resistência lateral ao longo dos reforços. No caso das geogrelhas, a este mecanismo há que adicionar a mobilização do impulso passivo nos elementos transversais da inclusão e, no caso de se verificar deslocamento relativo entre o solo situado acima e abaixo do reforço, a mobilização do atrito no solo ao longo das aberturas da grelha (Jewell *et al.*, 1984).

O dimensionamento de uma obra de reforço necessita do conhecimento do valor do coeficiente de ligação nas interfaces solo-inclusões (define-se coeficiente de ligação como sendo o coeficiente que mede a resistência global na interface solo-reforço, seja esta resultante apenas de um ou de vários mecanismos de interacção). A definição desse coeficiente pode ser feita, fundamentalmente, através de ensaios de corte directo e de arranque, estando a opção por um ou outro método dependente do tipo de movimento relativo entre o solo e os reforços que é responsável pela mobilização da resistência nas interfaces.

Os tipos de movimentos relativos com possibilidade de ocorrerem nas interfaces solo-inclusões são basicamente dois:

- num deles a inclusão permanece solidária com parte do solo envolvente, sendo a resistência na interface mobilizada pelo deslizamento da restante massa de solo relativamente ao reforço;
- no outro é a inclusão que se desloca em relação ao solo envolvente, sendo este movimento relativo o responsável pela mobilização da resistência na interface.

Tendo apenas este aspecto em mente, é aparente que os ensaios de corte directo simulam mais convenientemente os fenómenos que ocorrem nas interfaces no primeiro caso, ao passo que, no segundo, são os ensaios de arranque.

No caso de maciços reforçados predomina o deslocamento de arranque dos reforços em relação ao solo envolvente, pelo que a opção pelos ensaios de arranque para caracterizar as interfaces parece ser mais adequada. Esta opção, considerada correcta no caso dos reforços serem lineares e inextensíveis, está, ainda hoje, envolta em controvérsia, quando as inclusões são bidimensionais e compostas por materiais sintéticos. Esta controvérsia relaciona-se com a discussão da validade destes ensaios para o tipo de armaduras em causa (Lopes,1992) e com a falta de normalização existente.

É de realçar, que os ensaios de corte directo e de arranque estão associados a procedimentos de ensaios, trajectórias de tensão, mecanismos de rotura e condições fronteira distintas. Consequentemente, os parâmetros mecânicos definidos por cada um dos ensaios são muitas vezes diferentes e em alguns casos contraditórios. Urge, pois, definir os ensaios de corte directo e de arranque, por forma a que aumente a fiabilidade na definição das propriedades mecânicas das interfaces solo-geossintéticos em cada aplicação.

CAIXA PARA ENSAIOS DE ARRANQUE

Equipamento de ensaio

A caixa de arranque desenvolvida no Laboratório de Geotecnia da FEUP para estudo dos fenómenos de interacção solo-reforço está representada na Fig.1 e Foto1 e tem, interiormente, cerca de 1.53m de comprimento, 1.00m de largura e 0.80m de altura. A opção por um equipamento de grandes dimensões teve como objectivo a minimização da influência das fronteiras nos resultados obtidos, a qual, como é sabido, cresce na razão inversa das dimensões da caixa.

A caixa é composta por módulos por forma a permitir variações da altura do solo acima e abaixo da inclusão. Um dos módulos tem uma abertura, em praticamente toda a sua largura, permitindo ensaiar reforços com larguras até 0.75m. Para diminuir o efeito da proximidade da parede frontal rígida, nos resultados obtidos, utiliza-se uma manga

em aço inoxidável. Por seu turno, a uniformização da distribuição das pressões verticais é feita através da colocação, no topo da areia, de uma esponja com 0.025m de espessura.

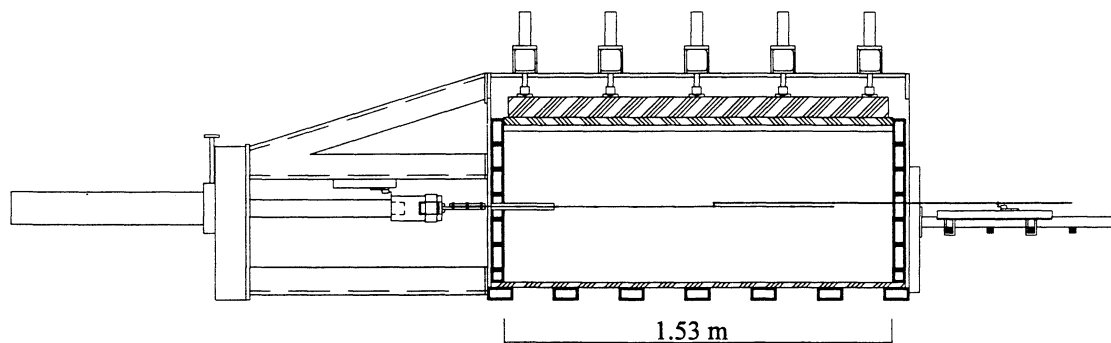


Fig.1 - Representação esquemática da caixa de arranque.

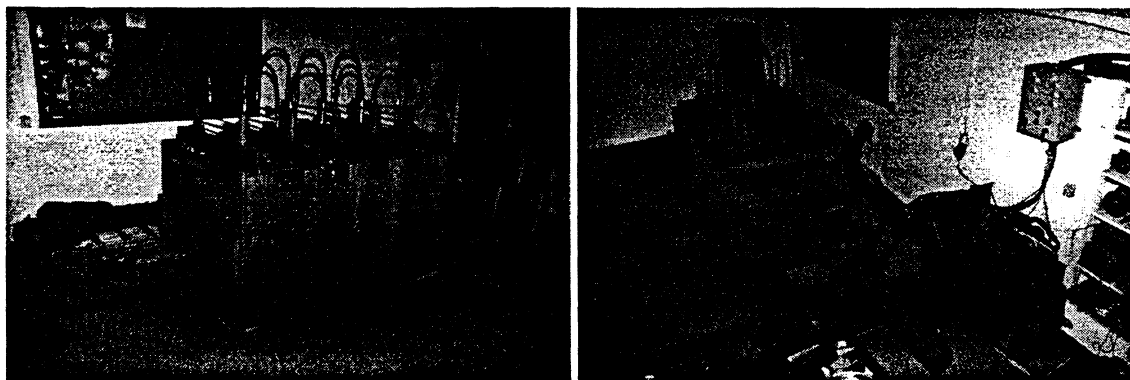


Foto 1 - Caixa de arranque.

A força de arranque é conseguida por um sistema hidráulico e é transmitida à amostra através de uma pega. O sistema hidráulico permite a aplicação de deslocamento constante. Através da colocação de dez cilindros de pequena dimensão na parte superior da caixa aplicam-se as pressões de confinamento pretendidas.

A força de arranque é medida por uma célula de carga. Por sua vez, a pressão de confinamento é avaliada através de uma célula de pressão colocada sob um dos dez cilindros atrás referidos. Finalmente, o deslocamento frontal e os deslocamentos ao longo dos reforços são medidos através de potenciômetros lineares. Os pontos de medição destes últimos são os indicados na Fig.2. O registo dos valores medidos é feito através de um sistema automático de aquisição de dados. É importante realçar que a medição dos deslocamentos em vários pontos do reforço é fundamental quando este é extensível, como é o caso dos geossintéticos. Com efeito, em reforços deste tipo o movimento durante o arranque apresenta duas componentes, uma correspondente à deformação por corte na interface solo-reforço e a outra relativa à elongação da própria

inclusão. Esta última de maior significado na parte anterior da amostra. A possibilidade de conhecer em separado cada uma das componentes do movimento permite, naturalmente, uma melhor compreensão do fenómeno de interacção entre o solo e os geossintéticos. É, pois, importante que em qualquer ensaio de arranque haja possibilidade de medir a deformação do reforço.

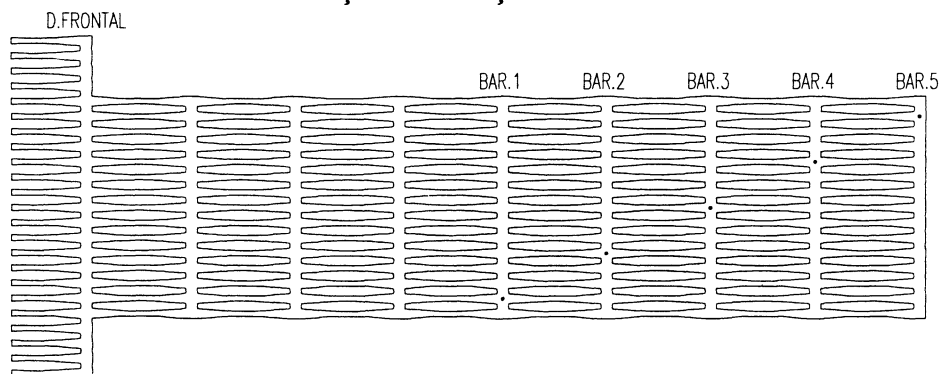


Fig.2 - Localização dos aparelhos de medição dos deslocamentos ao longo da geogrelha.

O solo é vertido de uma altura constante, em relação à base da caixa, de 0.40m e, até à data, a sua remoção é manual.

Materiais

O solo utilizado nos ensaios é arenoso, estando a sua curva granulométrica representada na Fig.3. Esta areia apresenta um diâmetro efectivo, D_{10} , de 0.35mm e uma densidade máxima e mínima de, respectivamente, 18.9kN/m^3 e 16.1kN/m^3 . O ângulo de atrito encontrado para a gama de tensões de confinamento ensaiadas varia entre 37.6° e 43.0° .

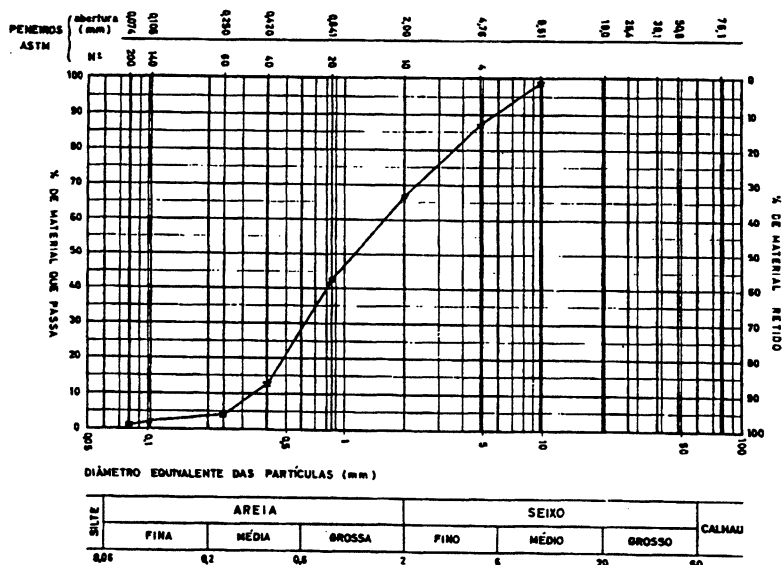


Fig.3 - Curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios.

O geossintético ensaiado foi uma geogrelha uniaxial com a geometria e a curva carga-deformação representadas na Fig.4. A amostra ensaiada tinha 0.33m de largura e 1.40m de comprimento, estando, no início do ensaio, confinado um comprimento de 0.95m.

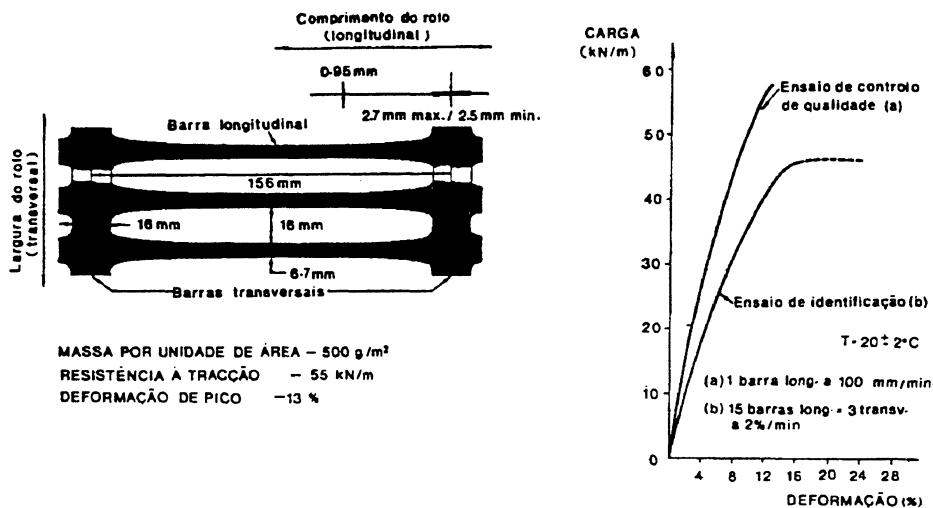


Fig.4 - Geometria e curva carga-deformação da geogrelha ensaiada.

Procedimento de ensaio

A areia é colocada em camadas de 0.15m, sendo cada uma delas nivelada e compactada à densidade desejada através de um martelo vibratório eléctrico. Depois da compactação a densidade do solo é controlada com um gamadensímetro. Quando o nível da manga é atingido coloca-se o reforço sobre o solo compactado introduzindo-o na referida manga colocada na parede frontal e com cerca de 0.20m de comprimento (no interior da caixa). Em seguida a geogrelha é prensada entre as duas placas que constituem a pega, através de parafusos, convenientemente distribuídos de modo a não ferirem a geogrelha. A pega é posicionada no exterior da caixa junto à parede frontal e à entrada da manga. São, então, colocados os arames inextensíveis utilizados para medição dos deslocamentos ao longo do reforço e ligados a potenciómetros lineares situados no exterior da parte posterior da caixa (ver Fig.1). O potenciómetro que mede o deslocamento frontal da amostra está situado no exterior da parte anterior da caixa. Posteriormente, são colocadas, niveladas e compactadas mais duas camadas de areia com 0.15m de espessura. No final a geogrelha ficará situada a meio de uma altura de areia de 0.60m, estando 0.30m situados abaixo e 0.30m situados acima do reforço.

O ensaio base é definido como sendo efectuado com uma amostra de geogrelha com 0.33m de largura e 0.95m de comprimento envolvido por solo, para uma tensão de confinamento de 46.7kPa, uma densidade da areia de 17.5kN/m³, uma espessura de solo de 0.60m (0.30m colocado abaixo da geogrelha e 0.30m acima), uma razão de deslocamento de 5.4mm/min e um comprimento de manga de 0.20m.

No Quadro I indica-se o programa de ensaios efectuado para o estudo da influência da tensão de confinamento e da velocidade de ensaio na força de arranque de uma geogrelha ensaiada no solo granular indicado.

QUADRO I
Programa de ensaios

Objectivo	Pressão de confinamento (kPa)	Velocidade (mm/min)
Ensaio base	46.7	5.4
Pressão de confinamento	26.0	5.4
	68.5	5.4
	87.8	5.4
Velocidade	46.7	1.8
	46.7	11.8
	46.7	22.0

ANÁLISE DE RESULTADOS

Preâmbulo

Os factores que afectam as propriedades resistentes nas interfaces solo-reforços são em grande número. De entre esses factores, dois dos que merecem especial destaque são a tensão de confinamento e a velocidade de arranque.

Com o objectivo de lançar algum esclarecimento acerca do fenómeno de interacção solo-reforço e de contribuir de algum modo para a normalização dos ensaios de arranque analisar-se-á, em seguida, a influência dos parâmetros referidos na força de arranque da geogrelha ensaiada.

Tensão de confinamento

A influência da tensão de confinamento na força de arranque do reforço ensaiado está representada na Fig.5.

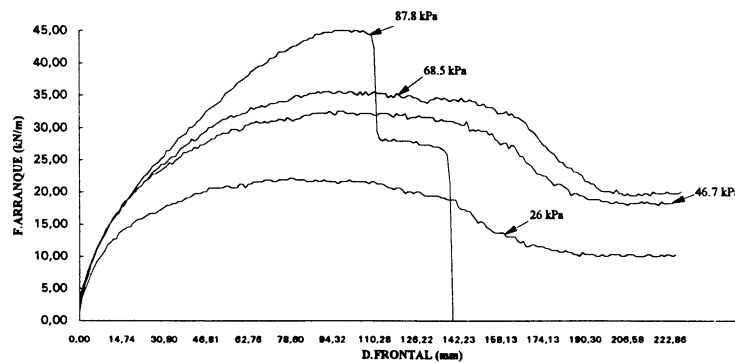
Constata-se um aumento contínuo da força de arranque com a tensão de confinamento (Fig.5a). Com efeito, a força de arranque aumenta de 21.9kN/m para 45.0kN/m quando a tensão de confinamento passa de 26.0kPa a 87.8kPa.

Definindo, de modo simplificado, o coeficiente de ligação na interface solo-inclusão

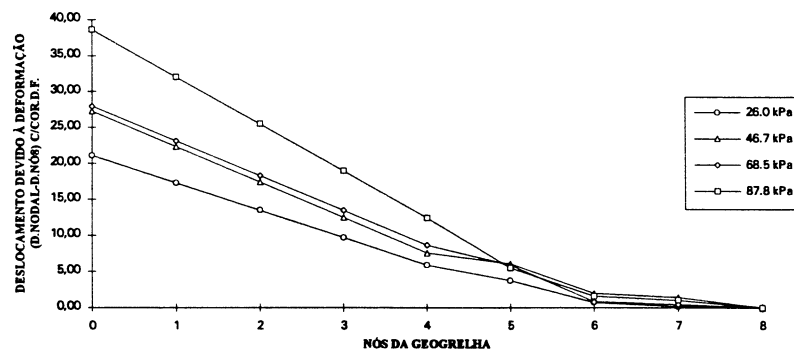
como sendo dado pela relação: $f = \frac{\tau}{\sigma_n \text{tg}\phi}$, em que τ e σ_n são, respectivamente, as

tensões tangencial e normal na interface e ϕ é o ângulo de atrito residual da areia. Verifica-se que o valor de f é de 0.643, 0.570, 0.540 e 0.450, respectivamente, para as tensões de confinamento de 26.0kPa, 46.7kPa, 68.5kPa e 87.8kPa. Concluiu-se, pois, o seguinte:

- o acréscimo da força de arranque com a tensão de confinamento é conseguido à custa do aumento desta tensão e não do aumento da resistência na interface, a qual, como se verificou atrás, diminui;
- a superfície de cedência ocorre na interface solo-reforço, tal é comprovado pelo valor do coeficiente de ligação inferior à unidade;
- o fenómeno de inibição da dilatância do solo com o aumento da tensão de confinamento carece de significado para o tipo de reforço ensaiado, dado que este pode ser considerado, na prática, bidimensional.



a)



b)

Fig.5 - Influência da tensão de confinamento: a) na força de arranque do reforço; b) nos deslocamentos ao longo do reforço.

A variação dos deslocamentos ao longo dos reforços com o acréscimo da tensão de confinamento está expressa na Fig.5b. Esta variação dos deslocamentos dá uma ideia da distribuição das tensões tangenciais ao longo da inclusão.

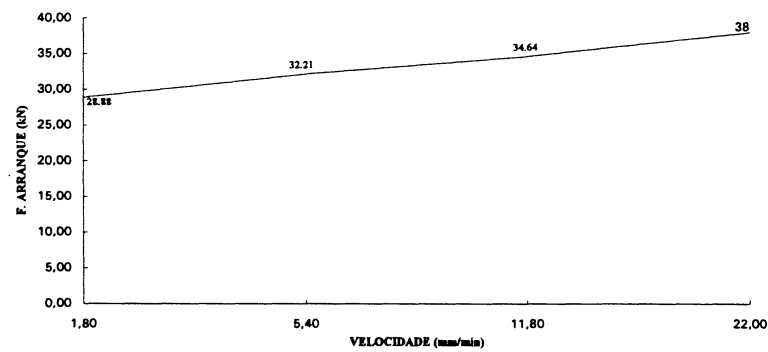
À medida que a deformabilidade das inclusões aumenta, aumenta a rigidez relativa solo-reforço; em consequência mobilizam-se importantes tensões tangenciais ao longo da interface entre os dois materiais associada a deslocamentos não uniformes ao longo da mesma interface. A deformabilidade das inclusões intervêm, pois, de modo significativo na distribuição daquelas tensões.

O crescimento da tensão de confinamento implica o aumento das tensões tangenciais mobilizadas ao longo, não se verificando, contudo, acréscimos na extensão de reforço solicitado.

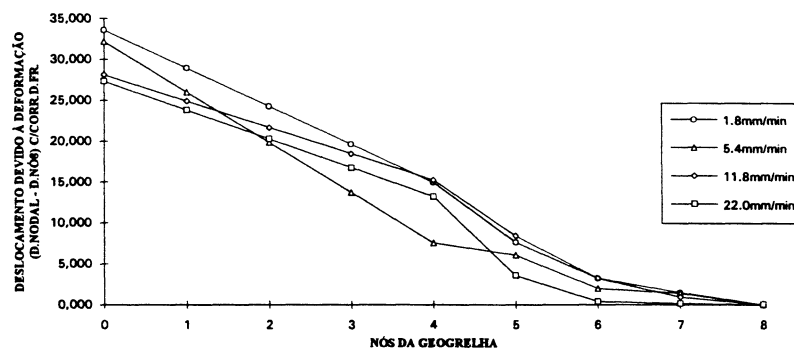
A não linearidade dos deslocamentos ao longo da inclusão aumenta com a tensão de confinamento, o que denota uma mobilização menos uniforme das tensões de corte sob tensões de confinamento altas.

Velocidade de arranque

A influência da velocidade de ensaio na força de arranque da geogrelha testada está expressa na Fig.6a. Constata-se que, à medida que essa velocidade aumenta cresce a força de arranque na inclusão de modo aproximadamente linear. Por sua vez os deslocamentos ao longo da inclusão (Fig.6b) evidenciam alterações relativamente pouco significativas com o aumento da velocidade de ensaio.



a)



b)

Fig.6 - Influência da velocidade de ensaio: a) na força de arranque do reforço; b) nos deslocamentos ao longo do reforço.

O coeficiente de ligação na interface solo-geogrelha é de 0.506, 0.570, 0.616 e 0.677, respectivamente, para as velocidades de ensaio de 1.8mm/min, 5.4mm/min, 11.8mm/min e 22.0mm/min.

Dos resultados obtidos conclui-se o seguinte:

- o acréscimo da velocidade de arranque conduz a um aumento da resistência mobilizada na interface solo-geogrelha;
- esse aumento de atrito mobilizado na interface resulta da diminuição da capacidade de rearranjo das partículas do solo com o aumento da velocidade de ensaio;
- a superfície de cedência é aproximadamente coincidente para qualquer das velocidades ensaiadas;

CONCLUSÕES

O estudo da influência da tensão de confinamento e da velocidade de ensaio na força de arranque de uma geogrelha envolvida por um solo arenoso permite formular as seguintes conclusões fundamentais:

- o aumento da tensão de confinamento e da velocidade de ensaio conduzem ao acréscimo da força de arranque na geogrelha;
- no caso da tensão de confinamento esse acréscimo é conseguido, não à custa do aumento da resistência na interface, mas sim, do acréscimo da tensão de confinamento;
- o aumento da resistência na interface solo-reforço devido ao acréscimo da velocidade de ensaio resulta da diminuição da capacidade de rearranjo das partículas sólidas com o aumento daquela velocidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar os seus agradecimentos à Arco Systems Portuguesa e Sociedade de Construções Soares da Costa pela cedência dos materiais ensaiados. Ao Laboratório de Ensaio de Materiais da FEUP e à Mota e Companhia pela cedência do equipamento de compactação e de controlo da mesma, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- Jewell, R.A.; Milligan, G.W.E.; Sarsby, R.W. e Dubois, D. (1984). *Interaction between soil and geogrids*. Proc. Conf. on Polymer Grid Reinforcement, Thomas Telford ed., London, pp.18-30.
- Juran, I.; Knochenmus, G.; Acar, Y.B. e Arman, A. (1988). *Pull-out response of geotextiles and geogrids (synthesis of available experimental data)*. Proc. of Symp. on Geotextiles for Soil Improvement, ASCE, Geotech. Special Publication, Vol. 18, pp.92-111.
- Lopes, M.L.C. (1992). *Muros reforçados com geossintéticos*. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.