

# O ENSAIO DE ARRANQUE PARA ESTUDO DOS FENÓMENOS DE INTERACÇÃO SOLO - REFORÇO

The pull – out test in the study of soil – reinforcement interaction

M. LADEIRA (\*)

M. LURDES LOPES (\*\*)

RESUMO – Descreve-se uma caixa de arranque de grandes dimensões especialmente projectada e construída para o estudo dos fenómenos de interacção solo-reforço. Os procedimentos de ensaio e materiais utilizados são também descritos. Estuda-se o comportamento da interface solo granular-geogrelha através de resultados de ensaios de arranque com estes materiais.

SYNOPSIS – A large dimension pull-out box, specially designed and built to study the soil-reinforcement interaction, is described. Testing procedures and materials used are also described. The behaviour of soil-reinforcement interfaces is studied based in pull-out tests results carried out with granular soil and geogrids.

## 1 – INTRODUÇÃO

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

Como exemplo refira-se que a selecção do geossintético a utilizar no reforço de um dado muro ou talude deveria estar associada à realização de ensaios com o material por forma a definir aspectos tão importantes do seu comportamento como: o comportamento tensão-deformação e a resposta ao arranque.

Os ensaios de arranque são considerados por muitos investigadores como o meio mais apropriado para a previsão das propriedades nas interfaces solo-inclusões, bem como para a identificação dos mecanismos que as influenciam quando o movimento relativo nas interfaces corresponde ao arranque da inclusão em relação ao solo envolvente (Andrawes e McGown, 1977; Eigenbrod e Locker, 1987; Lopes, 1992; Farrag *et al.*, 1993; Kharchafi e Dysli, 1993; Ladeira, 1995; etc.).

A inexistência de normalização de ensaios de arranque associada ao elevado número de factores que influenciam as propriedades mecânicas das interfaces solo-reforço tornam difícil a existência de resultados de ensaios comparáveis.

---

(\*) Eng.<sup>o</sup> Civil, Mestre em Estruturas de Engenharia Civil

(\*\*) Eng.<sup>o</sup> Civil, Prof. Auxiliar da FEUP.

De facto, 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).

Com o objectivo principal de lançar algum esclarecimento acerca dos fenómenos envolvidos no comportamento mecânico das interfaces solo-geossintético projectou-se e construiu-se no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia do Porto uma caixa de arranque de grandes dimensões que se procurou fosse tão versátil quanto possível, permitindo a análise da influência no comportamento das interfaces de alguns factores físicos, geométricos e mecânicos.

É com base nos resultados obtidos em ensaios de arranque realizados com este equipamento numa geogrelha uniaxial confinada por um solo granular que se procurará analisar neste trabalho o comportamento mecânico das interfaces solo granular-geogrelha.

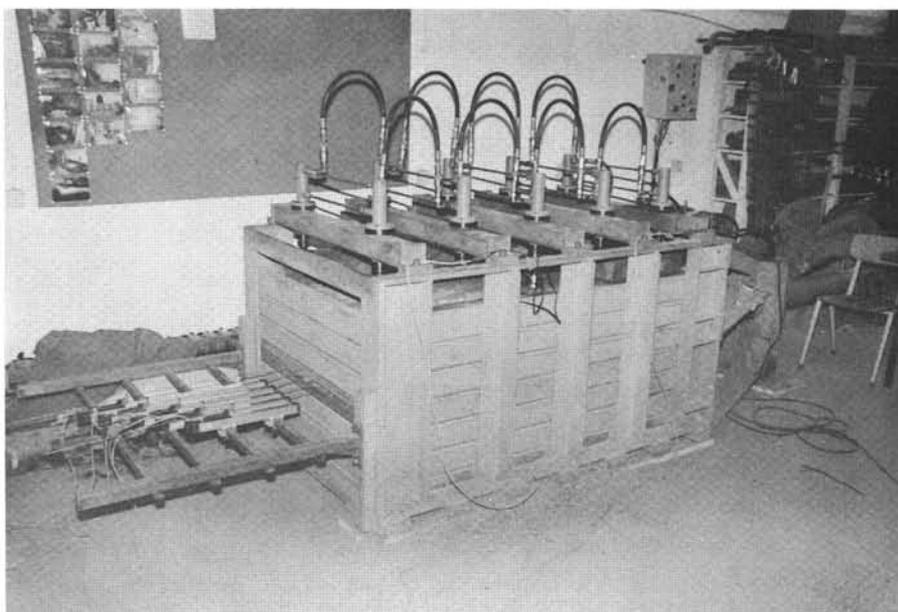
## 2 – EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

A caixa projectada e construída (ver Figuras 1 e 2) tem dimensões interiores de 1,53 m de comprimento, 1,00 m de largura e 0,80 m de altura. A opção por um equipamento de grandes dimensões teve como objectivo a minimização da influência das fronteiras nos resultados obtidos. A redução da influência da rigidez da fronteira superior e a garantia da uniformização da distribuição das pressões verticais aplicadas são conseguidas colocando, no topo da areia, uma placa de neoprene macio com 0,025 m de espessura. No intuito de diminuir o efeito da proximidade da parede frontal utiliza-se uma manga em aço inoxidável com 0,20 m de comprimento (no interior da caixa).

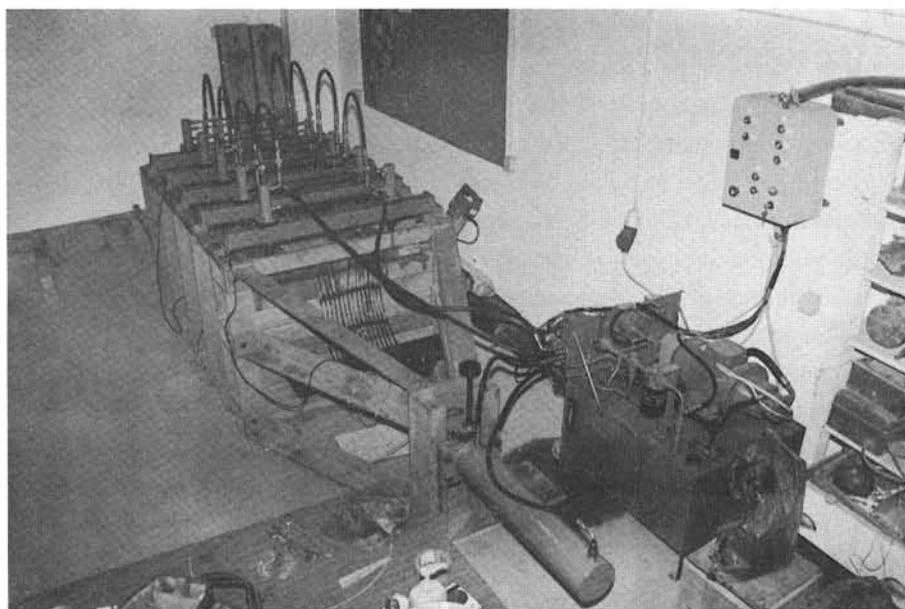
Em traços gerais, o equipamento consta de uma estrutura desmontável composta por módulos metálicos sobrepostos por forma a permitir variações da altura do solo acima e abaixo do nível a que se situa o reforço. Um dos módulos tem duas aberturas (uma na face anterior e outra na face posterior) em praticamente toda a sua largura, permitindo, assim, arrancar reforços com larguras até 0,75 m e a passagem dos arames inextensíveis para medição dos deslocamentos ao longo da inclusão.

A parede do lado em que se procede ao arranque das inclusões, designada por parede frontal, foi um elemento estrutural particularmente reforçado, uma vez que se comporta como um elemento rectangular composto por perfis justapostos e sujeito à força uniformemente distribuída do solo quando este é sujeito a tensões de corte por acção do arranque do reforço. Foi dada, ainda, uma atenção especial à estrutura de suporte do cilindro principal, que, devido às suas consideráveis dimensões, obrigou a perfis relativamente compridos estando assim sujeita a esforços de encurvadura.

É importante notar 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 é de maior significado na parte anterior da amostra, estando esta mais próxima do ponto de aplicação da força. 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.



a)



b)

Fig. 1 – Caixa de arranque: a) Vista frontal e sistema hidráulico; b) vista geral

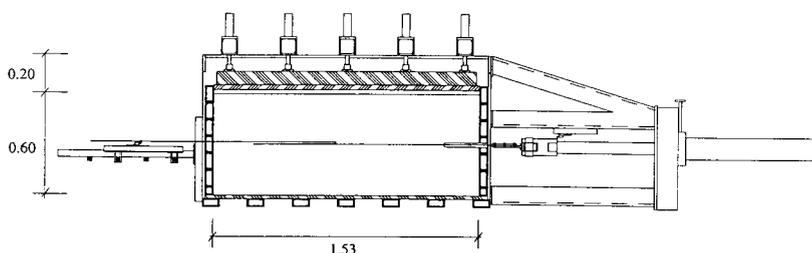


Fig. 2 – Representação esquemática da caixa de arranque

A medição dos deslocamentos em vários pontos ao longo do reforço é conseguida colocando varetas inextensíveis ligadas numa das extremidades ao geossintético através de peças que não o debilitam na sua resistência, estando na outra extremidade ligadas a potenciómetros lineares colocados no exterior da parte posterior da caixa (Fig. 1b). No exterior da parte frontal da caixa existe um potenciómetro linear para medição do deslocamento frontal da amostra.

A força de arranque é conseguida através de um sistema hidráulico (Fig. 1a). O equipamento de ensaio de arranque deve permitir a realização de ensaios com velocidade constante, sendo esta definida pelo utilizador. O melhor processo de obter estes requisitos consistiu na adopção de um circuito hidráulico, em que a bomba para os movimentos ditos principais (ou seja, arranque realizado a velocidade constante) é do tipo diesel. Esta bomba tem caudal variável, e dado estar dotada de pistões de apertadas tolerâncias, evidencia baixa flutuação de funcionamento e fugas extremamente reduzidas.

Os movimentos de aproximação do cilindro principal e activação dos cilindros calcadores são efectuados através de uma bomba de engrenagens, de caudal superior ao da bomba diesel, possibilitando movimentos mais rápidos. Com efeito, é através de dez cilindros de pequena dimensão colocados na parte superior da caixa, que as pressões de confinamento pretendidas são aplicadas (Fig. 1). Este conjunto de cilindros permite aplicar uma força de compressão à camada sobrejacente de solo, ou actuar como fronteira rígida, de modo que não exista a possibilidade da camada de solo se deslocar (volume constante).

A pressão de confinamento a aplicar em cada ensaio é seleccionada pelo utilizador, mantendo-se constante no decorrer do ensaio. Essa pressão de confinamento é avaliada através de uma célula de carga de compressão entreposta entre um dos cilindros calcadores e a placa superior de contraplacado (Fig. 3).

A força de arranque é medida através de uma célula de carga de tracção, especialmente concebida para o efeito, que está posicionada entre o veio do cilindro principal e a pega que transmite a força de arranque à amostra (Fig. 4). Esta pega é constituída por duas placas que comprimem a amostra entre ambas por aparafusamento.

O registo dos valores medidos é conseguido através de um sistema automático de aquisição de dados. Este sistema está ligado a um computador com software instalado especializado para este tipo de estudos, permitindo adquirir valores em ordem a várias grandezas (tais como: tempo, deslocamento, força, pressão, etc.). Neste trabalho optou-se pela aquisição de valores em ordem ao tempo.

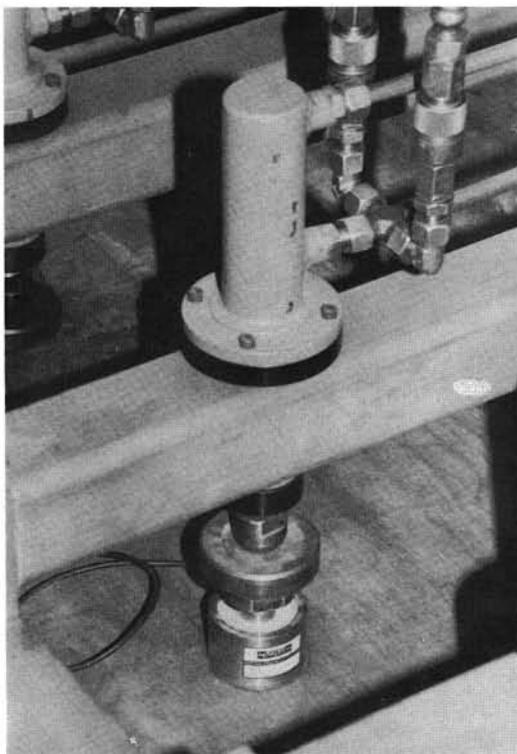


Fig. 3 – Célula de carga para medição da força de confinamento

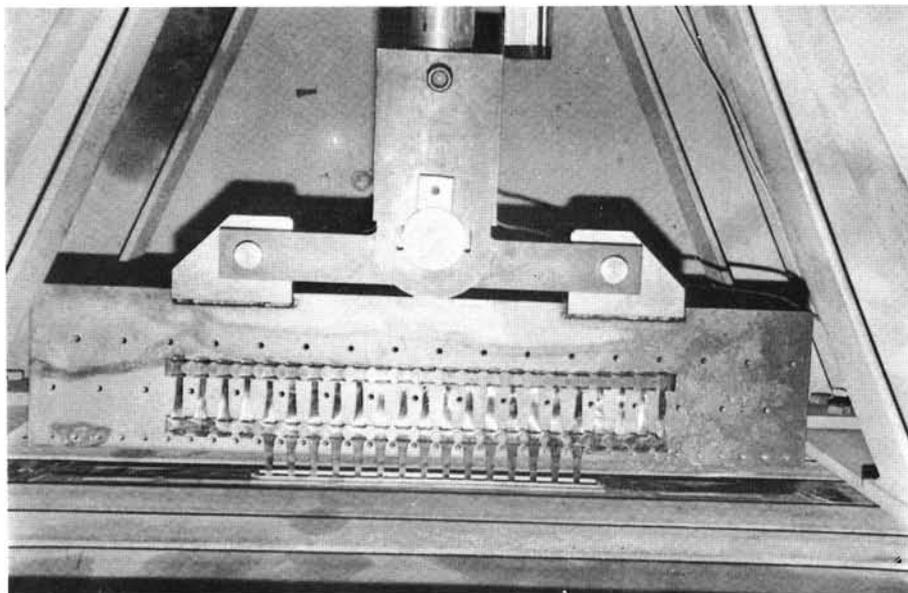


Fig. 4 – Célula de carga para medição da força de arranque e pega para transmissão dessa força

### 3 – MATERIAIS UTILIZADOS

O solo utilizado nos ensaios é arenoso, estando a sua curva granulométrica representada na Fig. 5. Esta areia apresenta valores dos diâmetros,  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ , e  $D_{60}$ , respectivamente, 0,35 mm, 0,62 mm, 1,20 mm e 1,70 mm, sendo o coeficiente de uniformidade,  $D_u$ , igual a 4,85 e o coeficiente de curvatura  $D_c$  igual a 0,65.

A densidade mínima determinada para o solo foi de  $16,1 \text{ kN/m}^3$ , sendo a densidade máxima igual a  $18,9 \text{ kN/m}^3$ . Nos ensaios realizados a areia encontrava-se com um teor em água próximo de 0,1%. O valor do ângulo de atrito residual encontrado para o solo, através de ensaios de corte directo, para a tensão de confinamento ( $46,7 \text{ kPa}$ ) e densidade ( $17,5 \text{ kN/m}^3$ ) presentes nos ensaios foi de  $35,1^\circ$ .

A geogrelha utilizada nos ensaios efectuados é uma geogrelha uniaxial em polietileno de alta densidade, cuja geometria e curva carga-deformação estão representadas na Fig. 6.

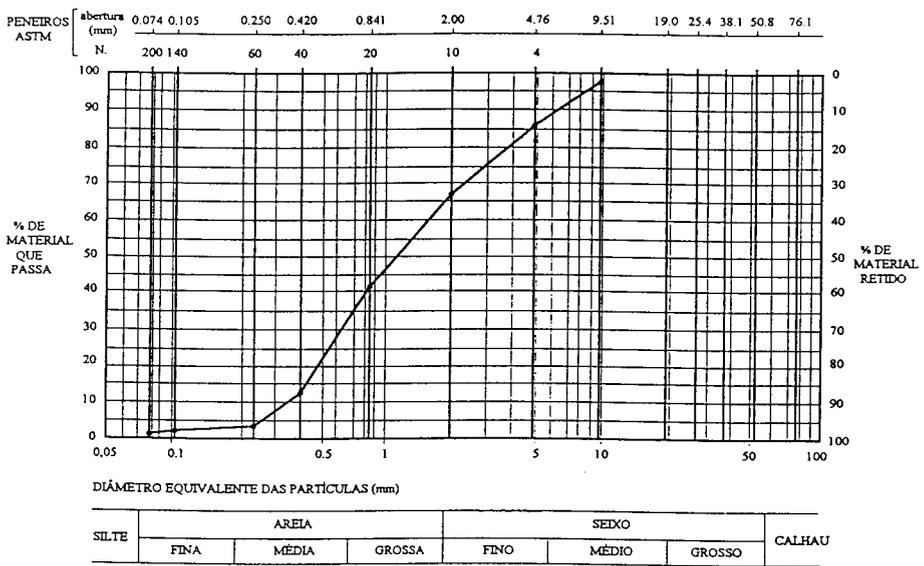


Fig. 5 – Célula de carga para medição da força de arranque e pega para transmissão dessa força

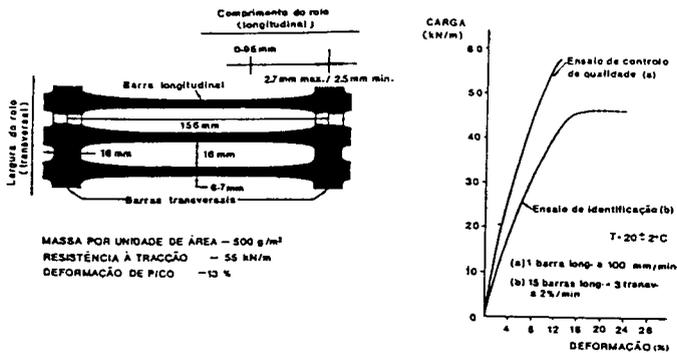


Fig. 6 – Geometria e curva carga deformação da geogrelha ensaiada

## 4 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Antes de iniciar os trabalhos com a caixa de arranque procedeu-se à calibração de todos os aparelhos, ou seja, potenciómetros lineares para medição dos deslocamentos e as duas células de carga, uma trabalhando à compressão e outra à tracção.

O enchimento da caixa com vista à realização de um ensaio de arranque consiste na colocação de camadas sucessivas de areia com 0,15 m de espessura após compactação. O volume de areia correspondente a cada camada é vertido de um balde de grua colocado a uma altura constante de 0,40 m em relação à última camada de areia colocada. Em seguida, cada camada é nivelada e compactada à densidade desejada através de um martelo vibratório eléctrico, sendo, após compactação, a densidade do solo controlada com um gamadensímetro.

Quando a superfície da areia atinge o nível da manga coloca-se o reforço sobre o solo compactado introduzindo-o na referida manga colocada na parede frontal. Em seguida, a extremidade anterior do reforço é prensada entre as duas placas que constituem a pega, através de parafusos, convenientemente distribuídos de modo a não danificarem a grelha a ensaiar. Quando a inclusão ensaiada for um geotêxtil, a zona a prensar deve ser anteriormente endurecida com uma resina epoxi.

A pega é, depois, posicionada no exterior da caixa junto à parede frontal e à entrada da manga. São, então, colocados os arames inextensíveis utilizados para a medição dos deslocamentos ao longo do reforço ligando-os aos potenciómetros lineares. Em seguida, posiciona-se o potenciómetro linear, situado no exterior da parte anterior da caixa, que mede o deslocamento frontal da amostra.

Posteriormente, são colocadas, niveladas e compactadas mais duas camadas de areia com 0,15 m de espessura. No final o reforço ficará posicionado a meio de uma altura de solo de 0,60 m, correspondendo a cerca de 0,92 m<sup>3</sup> de areia, estando 0,30 m situados abaixo e 0,30 m situados acima do reforço. São então colocadas as placas de neoprene macio e de contraplacado, sendo posteriormente colocadas as barras com os cilindros calcadores e feitas as respectivas ligações entre estes, ficando no final a caixa com o aspecto apresentado na Fig. 1.

Finalmente, selecciona-se a razão de deslocamentos (velocidade de ensaio) e a tensão de confinamento a utilizar, levando-se a zero todos os dispositivos antes de iniciar o ensaio.

## 5 – ENSAIO

### 5.1 – Definição

Para o estudo das características da interacção solo-geogrelhas procedeu-se ao ensaio de uma amostra de geogrelha cuja área inicial envolvida por solo apresenta 0,33 m de largura (15 barras longitudinais) e 0,96 m de comprimento (7 barras transversais). Na Fig. 7 representa-se, para além da geometria da inclusão, a localização dos pontos de medição dos deslocamentos ao longo desta.

A areia encontra-se a uma densidade igual a 17,5 kN/m<sup>3</sup>, sendo a pressão de confinamento aplicada ao nível da geogrelha de 46,7 kPa. A altura de solo localizado acima e abaixo do reforço é de 0,30 m, perfazendo uma altura total deste material de 0,60 m. Utiliza-se uma manga com um comprimento, no interior da caixa, de 0,20 m. O ensaio é efectuado com uma razão de deslocamentos (velocidade) igual a 5,4 mm/min.

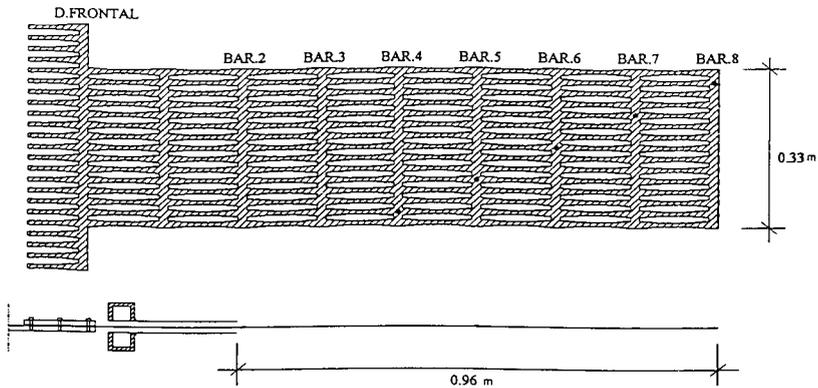


Fig. 7 – Geometria da amostra e localização dos pontos de medição ao longo desta

No Quadro I resume-se as características do ensaio.

Quadro I  
Características do ensaio

Geossintético	Dimensões da amostra Comp./Larg. (m)	Densidade do solo (kN/m <sup>3</sup> )	Pressão de confinamento (kPa)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Altura do acima/abaixo amostra (m)	Comprimento da manga (m)
Geogrelha	0,96/0,33	17,5	46,7	5,4	0,30/0,30	0,20

## 5.2 – Análise dos resultados

Na Fig. 8 representa-se a resposta ao arranque da geogrelha testada. A força máxima de arranque medida foi de 32,2 kN/m para um deslocamento frontal de 97,7 mm.

A avaliação da resistência ao corte mobilizada nas interfaces solo-geogrelhas durante o arranque destas carece do conhecimento da distribuição dos deslocamentos ao longo do reforço. Com efeito, contrariamente ao que acontece quando os reforços são rígidos, os deslocamentos ao longo de inclusões extensíveis, como é o caso das geogrelhas, não são constantes. Sendo, por outro lado, o somatório do deslocamento correspondente à deformação por corte na interface solo-reforço e do deslocamento relativo à elongação da própria inclusão.

Esta ocorrência simultânea de deslocamentos e deformações traduz-se numa distribuição complexa das tensões tangenciais ao longo das inclusões. Assim, é através da medição dos deslocamentos ao longo do reforço que é possível fazer uma ideia sobre a distribuição de tensões.

Com o objectivo de lançar algum esclarecimento acerca da mobilização progressiva da resistência, ao longo do comprimento da geogrelha, à medida que a força de arranque aumenta, procedeu-se ao registo dos deslocamentos ao longo do reforço para várias percentagens da força máxima de arranque medida.

Faz-se a representação dos deslocamentos e dos deslocamentos por deformação do reforço ao longo deste, nos pontos correspondentes às barras transversais da geogrelha que inicialmente

estão confinadas pelo solo. Tal representação, não apresenta diferenças significativas relativamente à correspondente ao comprimento de reforço confinado no instante em que a força de arranque é máxima. Por outro lado, entende-se que a representação adoptada (com medições dos deslocamentos nas barras transversais da grelha) é de melhor compreensão.

Assim, na Fig. 9 representa-se a variação dos deslocamentos ao longo do comprimento da geogrelha, que se encontra confinado no início do ensaio, para valores da força de arranque correspondentes a 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% da força máxima de arranque medida. Optou-se por não considerar percentagens inferiores às indicadas desta força por se ter constatado que os deslocamentos medidos eram de pouco significado, ou seja, que até 50% da força máxima de arranque a percentagem da resistência mobilizada na interface é pouco importante para as condições do ensaio levado a cabo.

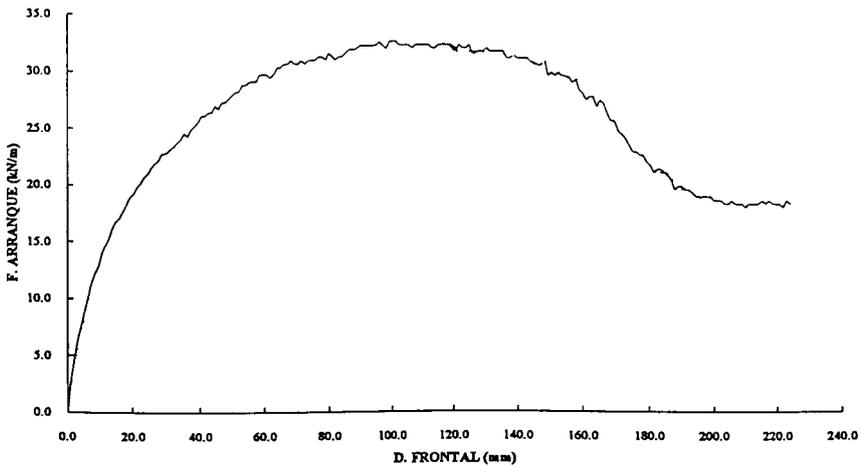


Fig. 8 – Variação da força de arranque com o deslocamento frontal (resposta ao arranque)

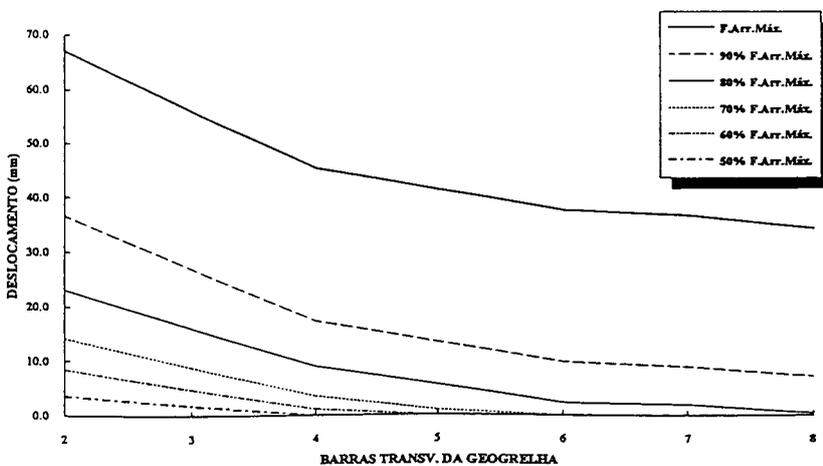


Fig. 9 – Distribuição dos deslocamentos ao longo do comprimento da geogrelha para diferentes percentagens da força de arranque máxima

Como se verifica da análise da figura, neste tipo de reforços a resistência é mobilizada progressivamente ao longo do seu comprimento à medida que a força de arranque aumenta. Até percentagens da força máxima de arranque da ordem dos 60% apenas o terço anterior do reforço contribui para a resistência. Para percentagens superiores da força, a resistência vai sendo progressivamente mobilizada na parte posterior do reforço. Quando se atinge os 80% da força máxima de arranque toda a extensão do reforço contribui para a resistência da interface, sendo para este valor da força que se inicia o movimento de arranque do reforço.

É possível, ainda, constatar da figura, o aumento significativo do incremento dos deslocamentos ao longo da inclusão para percentagens da força máxima de arranque superiores a 70%. Naturalmente que, o acréscimo desse incremento para percentagens da força máxima de arranque da ordem dos 90% e 100% está intimamente associado ao arranque do reforço.

Tal é comprovado na Fig. 10 na qual se procura dar uma ideia acerca da distribuição das tensões tangenciais ao longo do reforço, através do deslocamento devido à deformação deste, para as mesmas percentagens da força máxima de arranque consideradas na análise anterior.

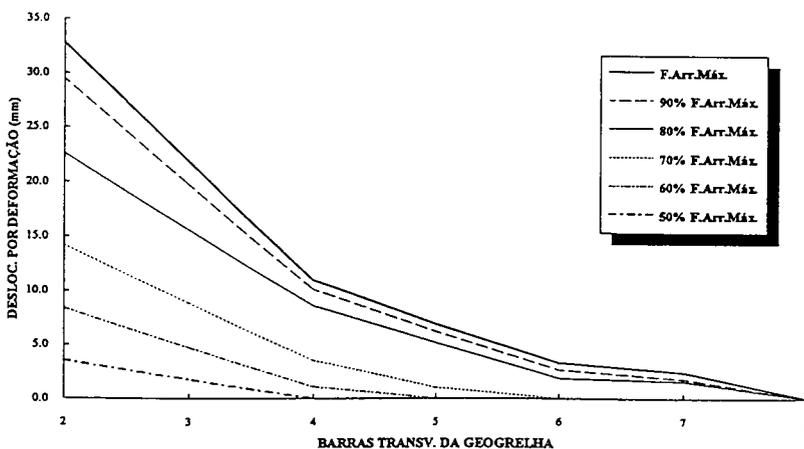


Fig. 10 – Distribuição dos deslocamentos por deformação ao longo do comprimento da geogrelha para diferentes percentagens da força de arranque máxima

No caso dos reforços serem grelhas a resistência da interface é constituída por duas parcelas: uma relativa ao atrito lateral e, outra, correspondente à mobilização da resistência passiva nas barras transversais da grelha. A contribuição de cada uma das parcelas é difícil de definir a partir dos resultados dos ensaios. Por isso, optou-se por definir, embora de modo simplificado, o coeficiente de resistência na interface solo-inclusões através da relação:

$$f = \frac{\tau}{\sigma_n \operatorname{tg} \phi} \quad (1)$$

em que  $\tau$  e  $\sigma_n$  são, respectivamente, as tensões tangencial e normal na interface solo-reforço e  $\phi$  é o ângulo de atrito residual da areia. Verifica-se que, o valor do coeficiente de resistência,  $f$ , para o ensaio efectuado é de 0,564.

Em resumo, poder-se-á dizer que o ensaio realizado nas condições referidas, conduziu a uma força máxima de arranque de 32,2 kN/m para um deslocamento frontal de 92,7mm, sendo o coeficiente de resistência da interface de 0,564.

## 6 – CONCLUSÃO

A transferência de tensões do solo para os reforços num maciço reforçado dá-se através da interacção entre o solo e o reforço. É, pois, fundamental a correcta definição desse mecanismo de interacção.

O equipamento apresentado ao longo deste trabalho permite a melhor caracterização dos fenómenos de interacção solo-reforços, em especial no caso do movimento relativo previsto *in situ* ser o de arranque da inclusão em relação ao solo envolvente.

Com os resultados apresentados pretende-se contribuir para a melhoria da compreensão dos fenómenos de interacção solo-reforços, particularmente quando estes são extensíveis com é o caso das geogrelhas.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRAWES, K.Z. e MCGOWN, A. – *Alteration of soil behaviour by inclusion of materials with different properties*. Proc. Symp. on Reinforced Earth, TRRL/Heriot-Watt University, Edinburgh, pp. 88-10, 1977.
- EIGENBROAD, K.D. e LOCKER, J.G. – *Determination of friction values for the design of sides slopes lined or protected with geosynthetics*. Canadian Geot. Journal, Vol. 24, nº 4, pp. 509-519, 1987.
- FARRAG, K.; ACAR, Y.B. e JURAN, I. – *Pull-out resistance of geogrid reinforcements*. Int. Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol. 12, nº 2, pp. 133-159, 1993.
- JURAN, I.; GUERMAZI, A.; CHEN, G.L. e IDER, M.H. – *Modelling and simulation of load transfer in reinforced soil: Part 1*. Int. Journal Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol. 12, pp. 141-155, 1988.
- LADEIRA, M.A.S.A. – *Estudo dos fenómenos da interacção solo-geossintético através de ensaios de arranque*. Dissertação para Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil na FEUP, Porto, 1995.
- LOPES, M.L.C. – *Muros reforçados com geossintéticos*. Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil na FEUP, Porto, 1992.
- KHARCHAFI, M. e DYSLI, M. – *Study of soil-geotextile interaction by a X-ray method*. Int. Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol. 12, nº 4, pp. 307-325, 1993.