

RESISTÊNCIA DAS INTERFACES SOLO-GEOGRELHA: PAPEL DA DENSIDADE E GRANULOMETRIA DO SOLO

THE ROLE OF THE SOIL DENSITY AND GRAIN SIZE ON THE RESISTANCE OF SOIL-GEOGRID INTERFACES

Lopes, M. Lurdes, *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*

Moutinho, Cláudia, *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*

RESUMO

A interacção solo-reforço é da máxima importância em qualquer sistema de solo reforçado. Com efeito, a transferência de tensões do solo para o reforço dá-se através da interface entre os dois materiais e o bom funcionamento do sistema depende da eficácia da interacção entre eles. A interacção solo-reforço pode ser afectada por um elevado número de parâmetros de entre os quais se destacam a densidade e granulometria do solo. Assim, com base em resultados de ensaios de arranque em que foram utilizados dois solos arenosos com granulometrias distintas, sendo um deles ensaiado para dois valores da densidade analisar-se-á o papel desempenhado pela densidade e granulometria do solo na interacção solo-reforço.

ABSTRACT

Soil-reinforcement interaction is of utmost importance in soil-reinforced systems and it can be influenced by a large number of parameters. In this paper the influence of soil density and soil grain size on the resistance of soil-geogrid interfaces is studied based on pull-out test results carried out with two granular soils with different grain size distributions, being one of them tested with two densities. The reinforcement used was a PEAD uniaxial geogrid.

1 - INTRODUÇÃO

Nos solos reforçados a transferência de tensões do solo para o reforço é feita através das interfaces entre os dois materiais. É, pois, essencial para o bom funcionamento do sistema que a interacção solo-reforço seja eficaz.

A interacção solo-reforço pode ser afectada por um elevado número de parâmetros, alguns deles relacionados com os tipos de materiais em contacto (por exemplo: tipo de solo, dimensão dos grãos, densidade, tipo de reforço (extensível, inextensível; uni ou bidimensional)), outros relacionados com as condições presentes *in situ* (por exemplo: tensão de confinamento, velocidade de deslizamento na interface, etc.) e outros, ainda, associados às características dos equipamentos laboratoriais disponíveis para a avaliação da interacção solo-reforço (por exemplo: dimensões do equipamento, dimensões da amostra, altura de solo adjacente à interface, etc.).

O ensaio laboratorial mais adequado à definição da resistência das interfaces solo-reforço depende do tipo de movimento relativo entre os dois materiais que se prevê que venha a ocorrer *in situ*. Assim, quando o reforço permanece solidário com parte do solo envolvente e a resistência na interface é mobilizada pelo deslizamento da restante massa de solo em relação ao reforço o ensaio laboratorial mais adequado será o de corte. Quando a resistência na interface é mobilizada pelo deslocamento do reforço em relação ao solo envolvente o ensaio laboratorial a realizar deverá ser o ensaio de arranque.

O movimento de arranque do reforço em relação ao solo envolvente está presente em muitos sistemas de solo reforçado, sendo particularmente importante em muros e taludes reforçados.

Na sequência de um estudo que tem vindo a ser levado a cabo no sentido de esclarecer o papel de alguns parâmetros no comportamento ao arranque dos reforços, particularmente das geogrelhas (Ladeira, 1995; Ladeira e Lopes, 1995), neste trabalho procurar-se-á por em evidência o papel da densidade e da granulometria do solo no referido comportamento através da análise de resultados de ensaios de arranque.

2 - EQUIPAMENTO E MATERIAIS

2.1 - Equipamento

O equipamento de ensaio utilizado, esquematicamente representado na Fig. 1, encontra-se amplamente descrito em Ladeira (1995), este equipamento tem, interiormente, 1,53m de comprimento, 1,00m de largura e 0,80m de altura.

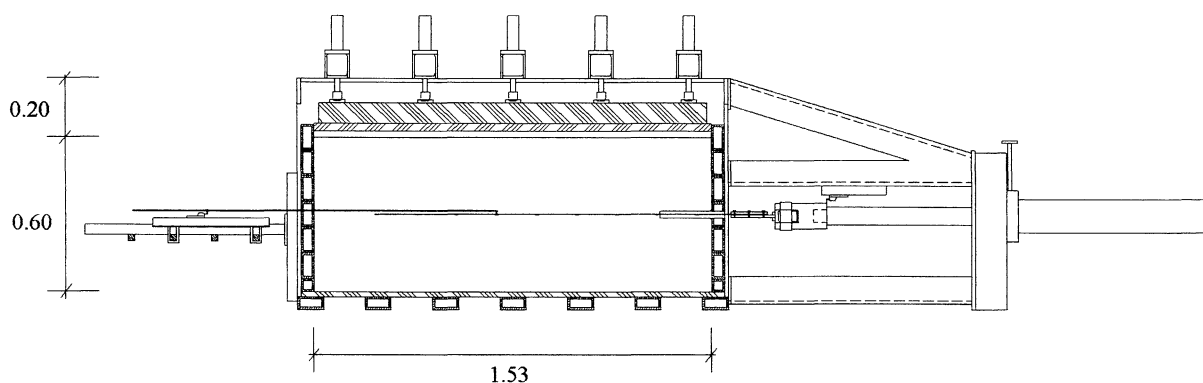


Figura 1 - Representação esquemática da caixa de arranque.

Nos ensaios realizados a amostra de reforço com 0,33m de largura e 1,06m de comprimento é colocada a meio de 0,60m de altura de solo compactado à densidade pretendida. Do comprimento total da amostra apenas 0,96m estão no início do ensaio em contacto com o solo, estando os restantes 0,20m envolvidos por uma manga em aço inoxidável existente na parede frontal da caixa com o objectivo de diminuir a influência desta fronteira nos resultados dos ensaios. A parte anterior da amostra está presa numa pega através da qual é transmitida a força de arranque ao reforço a uma velocidade de 5,4mm/min. Os deslocamentos ao longo do comprimento do reforço são medidos através de potenciómetros lineares colocados no exterior da caixa (5 na parte posterior e 1 na parte anterior, este último para medição do deslocamento frontal da amostra).

A pressão de confinamento é aplicada na parte superior da caixa através de dez cilindros de pequenas dimensões. A redução da influência da fronteira superior e a uniformização da distribuição das pressões verticais aplicadas é conseguida colocando uma placa de neoprene macio de 0,025m de espessura entre a superfície do solo e a placa de contraplacado à qual são aplicadas as pressões verticais. A pressão de confinamento utilizada nos ensaios realizados foi de 42,0kPa.

2.2 - Materiais

Nos ensaios realizados foram utilizados dois tipos de solos arenosos. As curvas granulométricas dos solos que ao longo deste trabalho serão designados por S1 e S2 estão representadas, respectivamente, nas Fig.s 2 e 3.

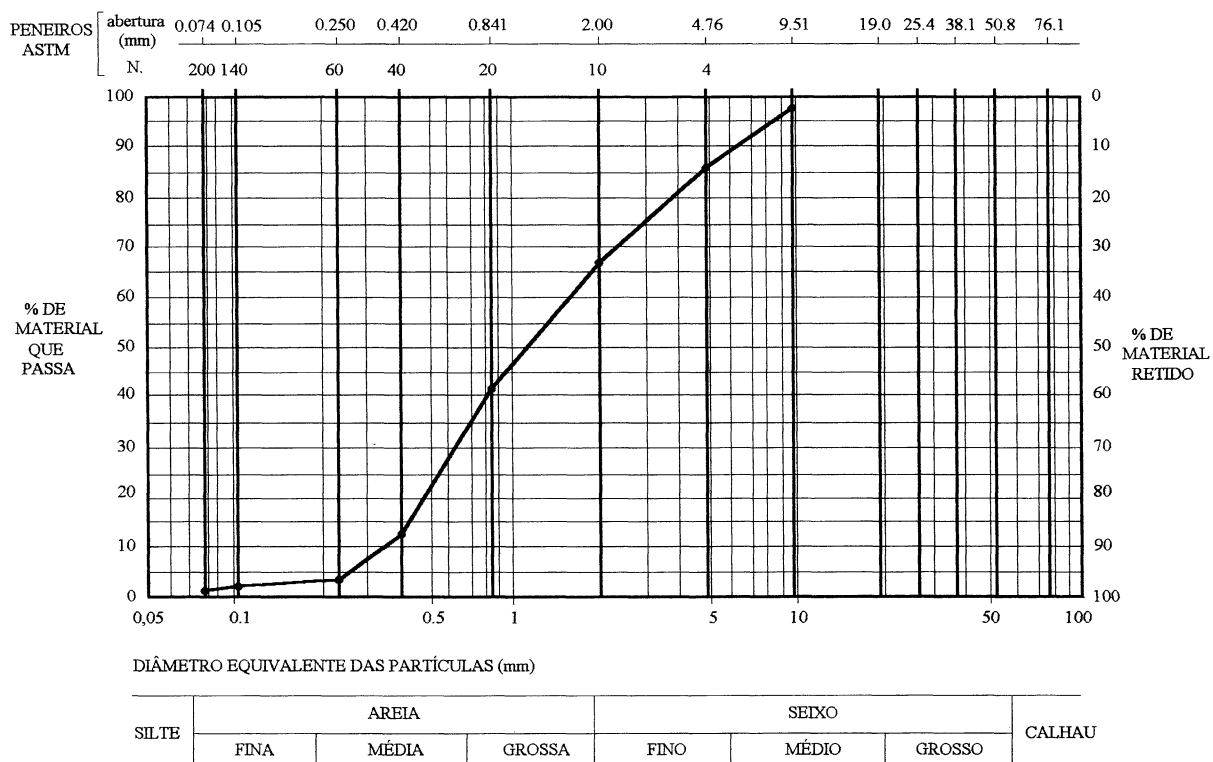


Figura 2 - Curva granulométrica do solo S1.

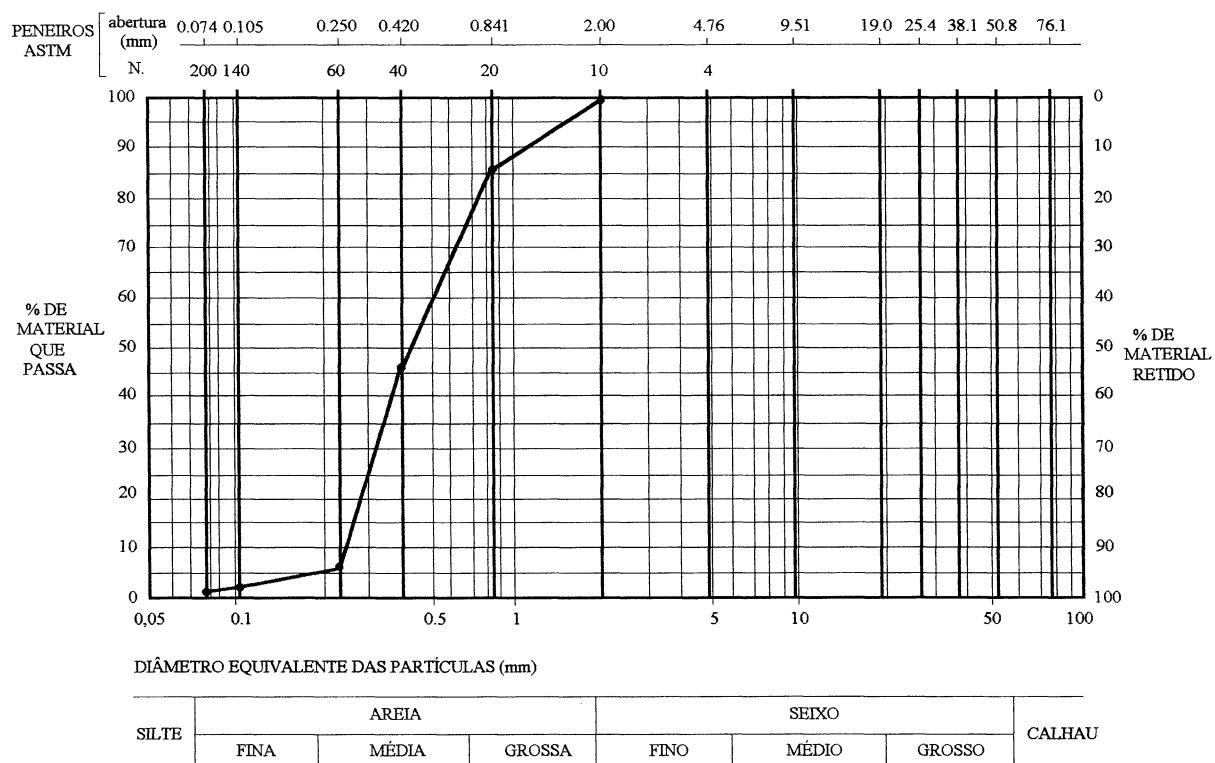


Figura 3 - Curva granulométrica do solo S2.

O solo S1 apresenta valores do diâmetro D_{10} de 0,35mm, sendo o coeficiente de uniformidade de 4,85. Os pesos volúnicos mínimo e máximo do solo são, respectivamente, de 16,1kN/m³ e 18,9kN/m³. Para a

tensão de confinamento aplicada nos ensaios o ângulos de atrito residual do solo são cerca de 35,2° e 35,7°, respectivamente, quando a densidade relativa do mesmo é de cerca de 54% e de cerca de 87,6%.

O solo S2 apresenta valores do diâmetro D_{10} de 0,26mm, sendo o coeficiente de uniformidade de 1,92. Os pesos volumicos mínimo e máximo do solo são, respectivamente, de 15,2kN/m³ e 16,5kN/m³. Para a tensão de confinamento e densidade relativa do solo utilizadas nos ensaios o ângulo de atrito residual do solo é de cerca de 29,4°.

O reforço ensaiado é uma geogrelha uniaxial em polietileno de alta densidade com 55kN/m de resistência à tracção, cuja geometria e curva carga-deformação estão representadas na Fig. 4. Esta geogrelha apresenta uma fracção sólida de área superficial por m² de reforço, α_a , de 0,40 e uma fracção de área transversal disponível para a mobilização da resistência passiva por m² de reforço, α_p , de 0,0125. O número de barras longitudinais por metro de largura deste geossintético é de 46 e o número de barras transversais por metro de comprimento é de 6,4.

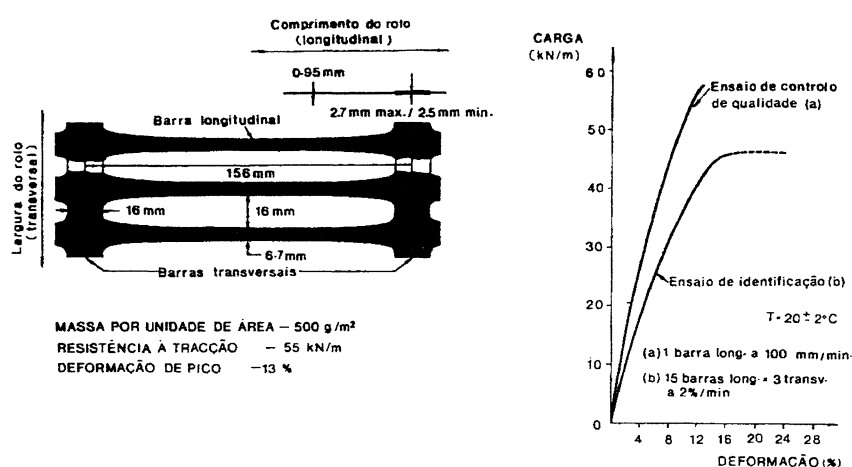


Figura 4 - Geometria e curva carga-deformação da geogrelha ensaiada.

3 - ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 - Programa de Ensaios

O Quadro 1 apresenta o programa de ensaios levado a cabo para o estudo do papel da densidade e da granulometria do solo no comportamento ao arranque da geogrelha ensaiada. No mesmo quadro indicase os valores adoptados para alguns dos parâmetros de ensaio.

Quadro 1 - Programa de ensaios.

Papel da:	Ensaio	Tipo de solo	D _r do solo (%)	Comp/Larg da amostra (m)	Pressão de conf. (kPa)	Veloc. de ensaio (mm/min)	Altura de solo acima/abaixo da amostra (m)	Comp. da manga (m)
Densidade do solo	E1	S1	54,0	0,96/0,33	42,0	5,4	0,30/0,30	0,20
	E2	S1	87,5	0,96/0,33	42,0	5,4	0,30/0,30	0,20
Granulometria do solo	E2	S1	87,5	0,96/0,33	42,0	5,4	0,30/0,30	0,20
	E3	S2	87,5	0,96/0,33	42,0	5,4	0,30/0,30	0,20
	E4	S2	87,5	0,96/0,33	42,0	5,4	0,30/0,30	0,20

O ensaio E4 é efectuado em condições idênticas às do ensaio E3, porém a amostra é ensaiada sem barras transversais, tal como a Fig. 4 mostra. Com base nos resultados do ensaio E4 é possível retirar alguma informação quanto à contribuição para a resistência na interface solo-reforço da mobilização da resistência passiva nas barras transversais da geogrelha.

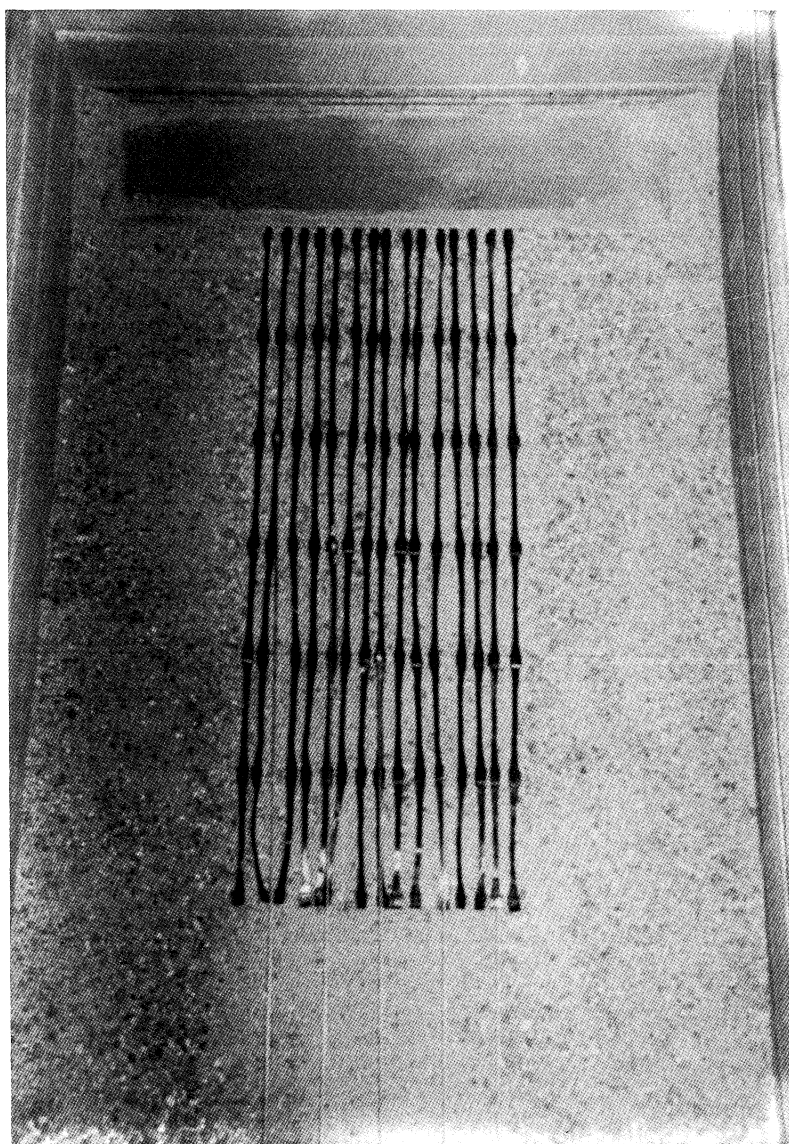


Figura 4 - Geogrelha posicionada na caixa de arranque, após corte das barras transversais.

3.2 - Influência da Densidade do Solo

A densidade dos solos granulares é um factor determinante da sua resistência e deformabilidade. No estado denso, o solo é menos deformável e mais resistente do que no estado solto, devido ao maior imbricamento dos grãos.

Assim, a resistência na interface solo-reforço é muito influenciada pela densidade do solo. A influência deste parâmetro na resposta ao arranque da geogrelha ensaiada foi avaliada realizando ensaios conduzidos com a areia apresentando pesos volúnicos de cerca de $17,5\text{kN/m}^3$ e de $18,5\text{kN/m}^3$, correspondendo, respectivamente, a densidades relativas de cerca de 54,0% e de 87,6%. Os restantes parâmetros de ensaio estão indicados no Quadro 1.

A Fig. 5 mostra a resposta ao arranque do reforço ensaiado nestas duas situações, considerando a variação da força de arranque com o deslocamento frontal da geogrelha (Fig. 5a), a variação dos deslocamentos ao longo do reforço para o valor da força máxima de arranque (Fig. 5b), e ainda, a distribuição dos deslocamentos por deformação do reforço ao longo deste, no mesmo instante (Fig. 5c).

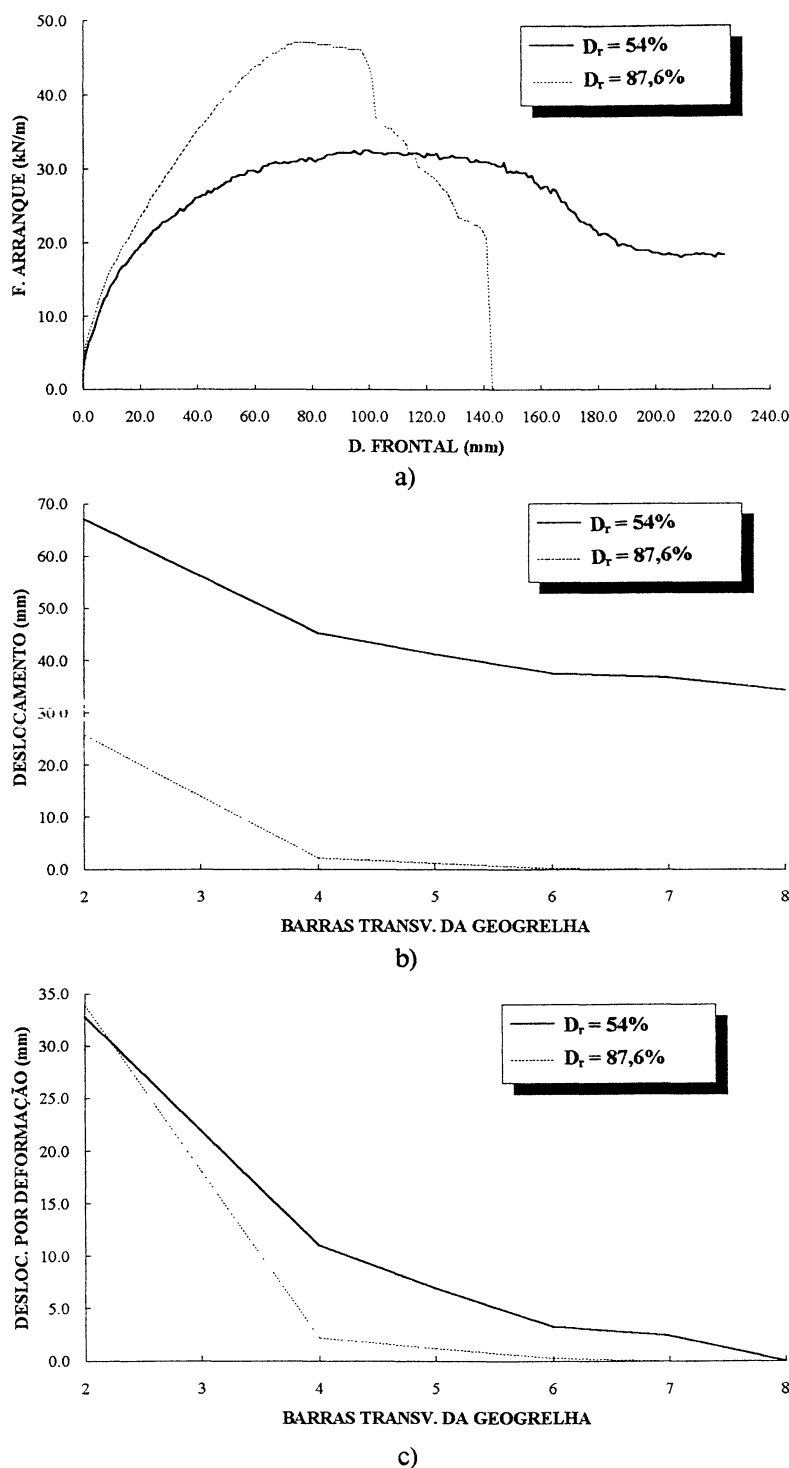


Figura 5 - Influência da densidade do solo: a) na força de arranque do reforço; b) nos deslocamentos ao longo do reforço para a força de arranque máxima; c) na distribuição, para esse instante, dos deslocamentos por deformação do reforço ao longo deste.

Constata-se que, enquanto no ensaio realizado com a areia mais solta ($D_r=54,0\%$) se atinge uma força de arranque máxima, igual a $32,2\text{kN/m}$, quando o deslocamento frontal é $92,7\text{mm}$, no ensaio com a areia mais densa ($D_r=87,5\%$) a geogrelha rompe por falta de resistência à tracção para um deslocamento frontal de $74,4\text{mm}$ (Fig. 5a). Globalmente poder-se-á dizer que a compactação do solo aumenta a sua resistência ao corte, devido ao maior imbricamento entre partículas, e a resistência tangencial mobilizável na interface. Assim, é incrementada a restrição do movimento da geogrelha o que consequentemente leva ao aumento do módulo de rigidez da interface e da força de arranque.

Conclui-se ainda que, o aumento da densidade do solo conduz a uma redução do comprimento da aderência necessário ao equilíbrio, estando esta última constatação expressa na Fig. 5b e c. Com efeito, no ensaio realizado com a areia mais densa, as duas últimas barras transversais (7ª e 8ª) não chegam a iniciar o seu movimento, ou seja, não se dá o arranque da geogrelha, rompendo esta, não por falta de aderência, mas sim por falta de resistência à tracção. Como se pode verificar da Fig. 5b e c praticamente só o terço anterior do reforço contribui para a resistência.

3.3 - Influência da Granulometria do Solo

O estudo do papel da granulometria do solo no comportamento ao arranque de reforços tipo geogrelha envolveu a realização de ensaios de arranque com o mesmo tipo de reforço e dois solos granulares com curvas granulométricas diferentes (solos tipos S1 e S2 (ver Figs 2 e 3, respectivamente)). É de notar que, ao considerar solos diferentes, parâmetros como os ângulos de atrito de pico e residual e o pesos volúmicos mínimo e máximo do solo são, naturalmente, distintos, podendo essas diferenças introduzir alterações em mais do que um parâmetro determinante de comportamento.

Com o objectivo de tentar aproximar o mais possível as condições de ensaio para os dois solos testados procurou-se proceder à colocação e compactação dos solos na caixa de arranque de modo a que as densidades relativas destes fossem semelhantes nos ensaios em comparação. Assim, os ensaios cujos resultados serão considerados na análise do papel da granulometria do solo no comportamento ao arranque do reforço testado foram realizados com os solos apresentando densidades relativas da ordem dos $87,5\%$, o que corresponde a pesos volúmicos da ordem de $18,5\text{ kN/m}^3$ e $16,3\text{ kN/m}^3$, respectivamente, para os solos tipo S1 e S2.

A Fig. 6 expressa a influência da granulometria do solo no comportamento ao arranque da geogrelha ensaiada em termos da variação da força de arranque com o deslocamento frontal do reforço (Fig. 6a), dos deslocamentos ao longo do reforço para o valor da força máxima de arranque (Fig. 6b), e ainda, da distribuição dos deslocamentos por deformação do reforço ao longo deste, no mesmo instante (Fig. 6c).

No ensaio com o solo S1 a resistência máxima à tracção da geogrelha ensaiada é atingida para um deslocamento frontal da ordem dos $74,4\text{mm}$, rompendo o reforço por falta de resistência à tracção e não por falta de resistência ao arranque. Com efeito, a rotura dá-se na área do reforço não confinada por solo situada no interior da manga existente na parede frontal do equipamento de ensaio. Para o estado de tensão e densidade do solo consideradas a resistência ao arranque real do reforço é superior ao valor registado no ensaio.

Quando o solo ensaiado é o S2 a força máxima de arranque registada é de cerca de $30,1\text{kN/m}$, ocorrendo para um deslocamento frontal de cerca de $62,6\text{mm}$. Este comportamento é bastante distinto do observado para o solo S1 e pode ser justificado com base na granulometria dos dois solos do seguinte modo: a) o solo S1 apresenta cerca de 34% de partículas de dimensão superior a 2mm (dimensão máxima dos grãos do solo S2), atingindo uma dimensão máxima de cerca de 10mm ; b) as dimensões dos grãos do solo S1 superiores a 2mm são compatíveis com a possibilidade de penetração nas aberturas da geogrelha, uma vez que a largura destas é da ordem dos 16mm ; c) por outro lado, sendo a espessura máxima das barras transversais da geogrelha de $2,7\text{mm}$, essas partículas, atendendo

às suas dimensões, têm possibilidade de mobilizar mais eficazmente o impulso passivo nessas barras, uma vez que se podem dispôr no interior das aberturas da geogrelha com os extremos localizados para cima e para baixo das barras transversais.

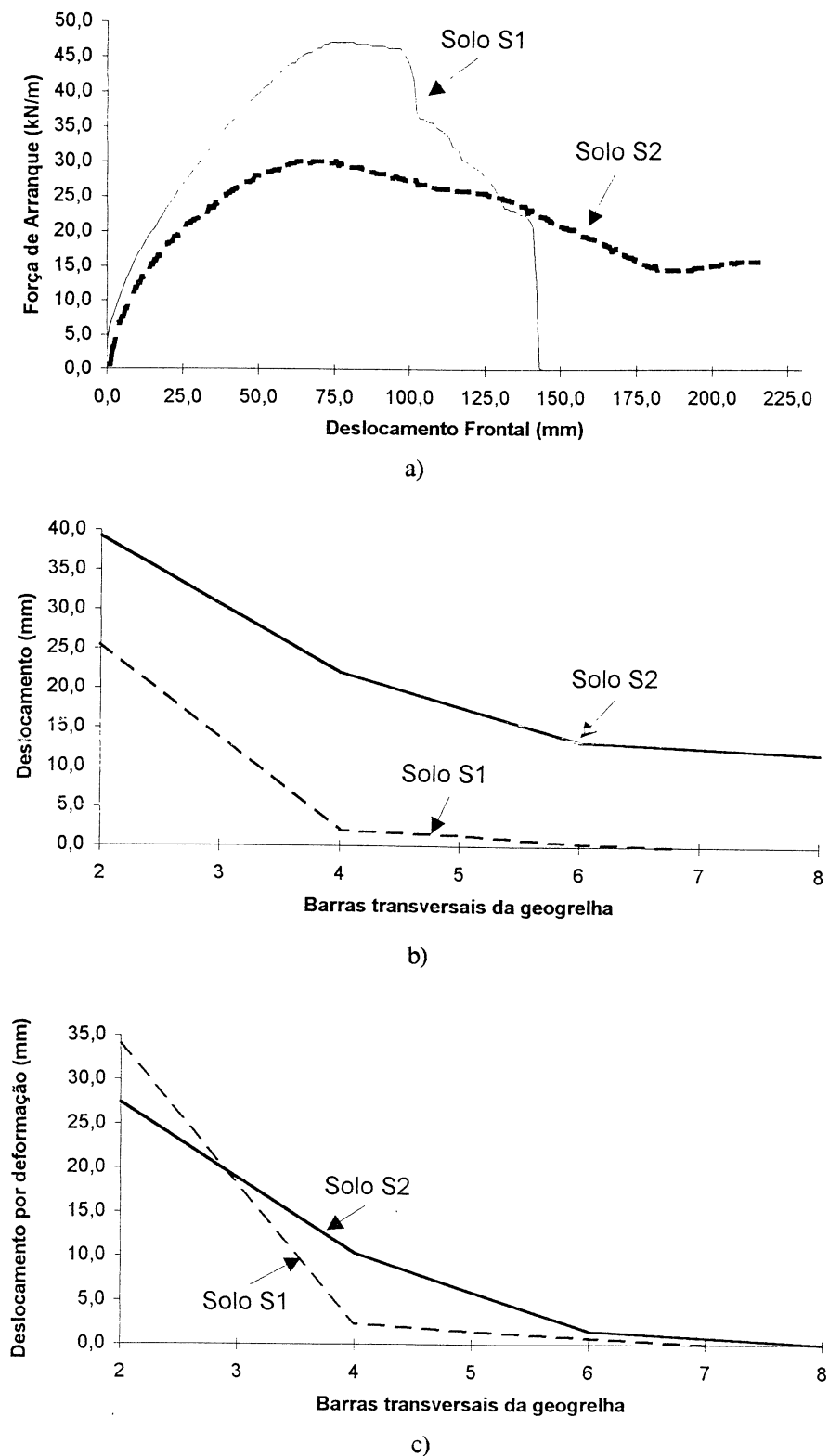


Figura 6 - Influência da granulometria do solo: a) na força de arranque do reforço; b) nos deslocamentos ao longo do reforço para a força de arranque máxima; c) na distribuição, para esse instante, dos deslocamentos por deformação do reforço ao longo deste.

No ensaio realizado com o solo S2 a rotura ocorre por falta de resistência à adesão, apresentando deslocamentos totais superiores aos registados com o solo S1 (Fig. 6b) (note-se que com este último tipo de solo o movimento das duas últimas barras transversais da geogrelha é nulo). Porém, os maiores deslocamentos por deformação do reforço ocorrem no ensaio com o solo S1 (Fig. 6c), podendo na realidade ser ainda maiores do que os medidos, uma vez que, no ensaio, a rotura se dá por falta de resistência à tracção e não por falta de adesão. Estas constatações, permitem admitir uma maior eficácia na mobilização da resistência na interface solo-geogrelha ensaiada quando o solo utilizado é o solo S1.

Com o objectivo de definir, aproximadamente, a parcela de resistência da interface solo-reforço correspondente à mobilização da resistência passiva nas barras transversais da geogrelha ensaiada com o solo S2, procedeu-se à realização de um ensaio em tudo igual ao designado no Quadro 1 por E3, mas em que foram cortadas as barras transversais à amostra de reforço ensaiada (ver Fig. 4). Este ensaio é designado no Quadro 1 por ensaio E4.

A Fig. 7 mostra a variação da força de arranque com o deslocamento frontal registada nos ensaios E3 (reforço com barras transversais) e E4 (reforço sem barras transversais).

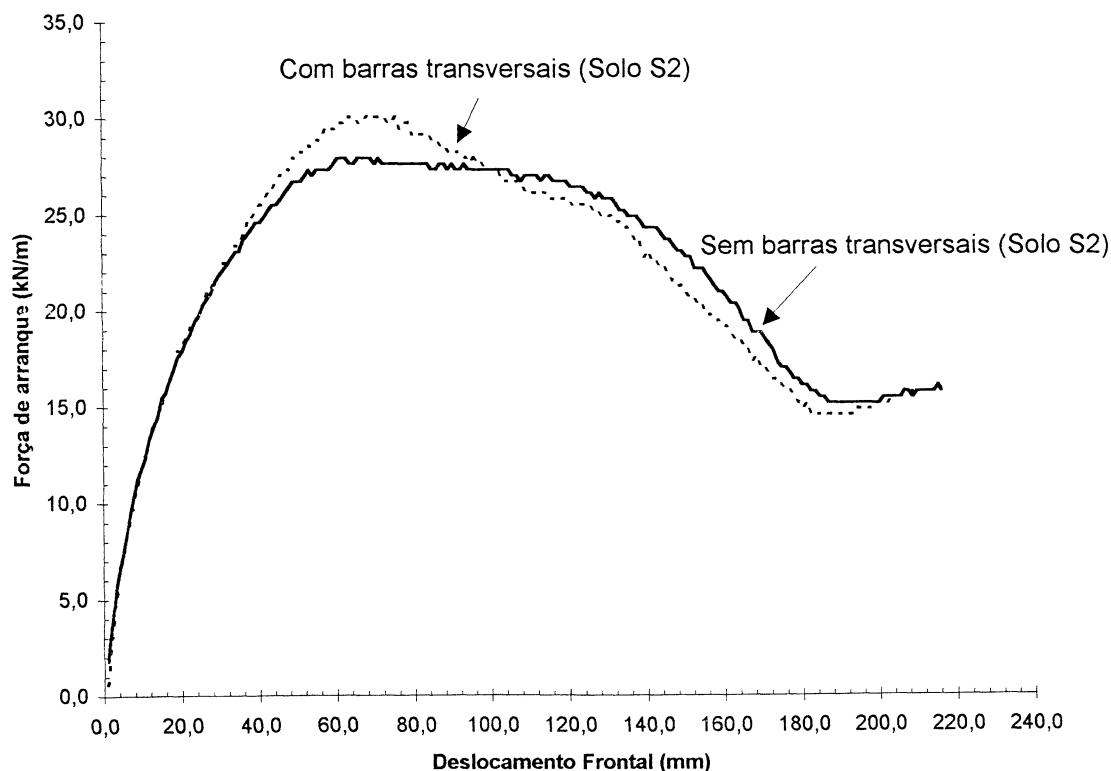


Figura 7 - Influência das barras transversais da geogrelha na variação da força de arranque com o deslocamento frontal.

A força de arranque máxima registada no ensaio sem barras transversais é de cerca de 27,9kN/m e ocorre para um deslocamento frontal de cerca de 60,3mm. Como já foi referido atrás, no ensaio com barras transversais o valor máximo registado para a força de arranque foi de cerca de 30,1kN/m na altura em que o deslocamento frontal da amostra era de 62,6mm. Como se verifica as diferenças registadas, quer no valor da força, quer do deslocamento são pouco importantes o que denuncia que, nas condições do ensaio E3, a parcela de resistência na interface correspondente à mobilização da resistência passiva nas barras transversais da geogrelha é pequena devido, provavelmente, à reduzida dimensão dos grãos do solo S2 (diâmetro máximo=2mm) quando comparada com a da altura das barras transversais da geogrelha ensaiada (2,7mm).

Resultados publicados (Ladeira, 1995) de ensaios idênticos aos ensaios E3 e E4 realizados com o solo S1 com uma densidade relativa de cerca de 54,0% mostram uma redução da força de arranque máxima de cerca de 40% no ensaio realizado sem barras transversais. Estes resultados evidenciam que, com o solo S1, a mobilização da resistência passiva nas barras transversais da geogrelha constitui uma parcela importante da resistência da interface solo-reforço.

É de realçar, que os resultados apresentados constituem a primeira abordagem do estudo da influência do tipo de solo no comportamento ao arranque de reforços. Outras condições de ensaio e outros tipos de solos deverão ser estudados com vista ao pleno esclarecimento do papel que o solo tem na mobilização da resistência da resistência nas interfaces solo-reforço, especialmente quando este último é uma grelha.

4 - CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se estudar a influência da densidade e granulometria do solo na resistência da interface solo-reforço através da realização de ensaios de arranque. Com base nos resultados obtidos é possível formular as seguintes conclusões fundamentais:

- quando a densidade do solo aumenta é incrementada a sua resistência ao corte conduzindo a uma redução do comprimento de aderência do reforço necessário ao equilíbrio;
- utilizando solos mais densos consegue-se uma mais efectiva ancoragem do reforço ocorrendo a rotura daquele (no caso do reforço ensaiado), na sua parte não confinada, por falta de resistência à tracção;
- a granulometria do solo influencia de forma importante o comportamento da interface solo-geogrelha, uma vez que a dimensão dos grãos do solo é factor determinante na capacidade de mobilização da resistência passiva nas barras transversais das grelhas;
- os resultados apresentados constituem a primeira abordagem do estudo da influência do tipo de solo no comportamento das interfaces solo-reforço, necessitando de um maior aprofundamento, não só pela diversidade de materiais disponíveis para utilização, mas também pelo conjunto de alterações que, em termos de parâmetros determinantes de comportamento, são introduzidos pela utilização de diferentes tipos de solo.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Programa PRAXIS XXI o apoio financeiro concedido através do projecto 3 / 3.1 / CEG / 2598 / 95.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ladeira, M. A. S. A. (1995). Estudo dos fenómenos da interacção solo-geossintético através de ensaios de arranque. Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, Porto, 196p.

M. Ladeira; M. Lurdes Lopes. (1995). O ensaio de arranque para o estudo dos fenómenos de interacção solo-reforço. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Geotecnia, nº 74, pp. 39-49.