

O ENSAIO DE CORTE EM PLANO INCLINADO PARA ESTUDO DOS FENÓMENOS DE INTERACÇÃO SOLO-GEOSSINTÉTICO

Inclined plane shear test to study soil-geosynthetic interaction phenomena

Patrícia Lopes*

M. Lurdes Lopes**

RESUMO - A resistência das interfaces solo-geossintético é estudada através da realização de ensaios de corte em plano inclinado. O equipamento desenvolvido é apresentado. A metodologia de ensaio é descrita. As características do solo e do geossintético utilizado são identificadas e os resultados dos ensaios efectuados são analisados. Finalmente, são formuladas algumas conclusões, em termos da adequação do ensaio ao estudo dos fenómenos de interacção solo-geossintético em taludes.

SYNOPSIS - Soil-geosynthetic interface resistance is studied by carrying out inclined plane shear tests. A developed apparatus is presented and test methodology is described. Soil and geosynthetic characteristics are identified and the tests results are analysed. Finally, some conclusions are put forward, namely in what concerns the fiability of the test to study soil-geosynthetic interaction phenomena, in slopes.

1 – INTRODUÇÃO

Os métodos mais utilizados para o estudo dos fenómenos de interacção solo-geossintético são os que lançam mão de ensaios de corte directo e de ensaios de arranque, aos quais estão associados procedimentos de ensaio, trajectórias de tensão, mecanismos de rotura e condições fronteira distintas. A opção por um ou outro tipo de ensaio está dependente do tipo de geossintético e do tipo de movimento relativo entre este e o solo, que é responsável pela mobilização da resistência nas interfaces.

No caso de o geossintético permanecer solidário com parte do solo envolvente e a resistência na interface ser mobilizada pelo deslizamento da restante massa de solo relativamente ao geossintético o ensaio mais adequado é o de corte directo.

Se, por outro lado, o geossintético se deslocar em relação ao solo envolvente é este movimento relativo o responsável pela mobilização da resistência na interface sendo, nesta situação, o ensaio mais adequado para a determinação da resistência da interface o ensaio de arranque.

Com o objectivo de ultrapassar algumas limitações dos ensaios de corte directo (Pinho Lopes, 1998) e para conseguir simular em laboratório as condições existentes em obra de forma mais realista, têm sido desenvolvidos ensaios de corte modificados: ensaios de corte em plano inclinado e ensaios de corte directo com o geossintético inclinado.

O ensaio de corte em plano inclinado é especialmente importante em situações em que os geossintéticos são colocados sobre taludes como constituintes, por exemplo, de sistemas de

* Mestre em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica da FEUP; aluna de doutoramento da FEUP

** Professora Associada da FEUP

protecção contra a erosão ou de sistemas de impermeabilização de taludes laterais de aterros de resíduos. É de realçar o seu interesse nos casos mencionados, pois nessas estruturas, em regra, a rotura dá-se por falta de resistência nas interfaces entre os diferentes materiais que constituem os sistemas.

Tendo em consideração estas circunstâncias, decidiu-se dar especial atenção, neste trabalho, ao estudo do mecanismo de interacção solo-geossintético quando o movimento relativo na interface é de corte em plano inclinado.

Para este efeito, a equipa de investigação da área de geossintéticos da FEUP desenvolveu o projecto e mandou construir um equipamento de ensaio de corte em plano inclinado, que procurou que fosse tão versátil quanto possível e cuja descrição será feita neste trabalho.

No equipamento desenvolvido os fenómenos de interacção solo-geossintético em taludes foram estudados, procurando-se comprovar a eficácia do método no progresso dos conhecimentos neste domínio.

2 – ENSAIO DE CORTE EM PLANO INCLINADO: REFERÊNCIA NORMATIVA

Os procedimentos do ensaio de corte solo-geossintético em plano inclinado encontram-se descritos na prEN ISO 12957-2 (Geotextiles and geotextile-related products – Determination of friction characteristics – Part 2: inclined plane method) desenvolvida pelo Grupo de Trabalho 3 (Ensaio Mecânicos) da Comissão Técnica 189 (Geotêxteis e Produtos Relacionados) da Comissão Europeia de Normalização. De seguida referem-se alguns dos aspectos mais relevantes relativos a esses procedimentos de ensaio.

Assim, devem ser preparados três provetes (cortados de acordo com o especificado na Norma Europeia EN 963), para cada direcção do geossintético a ensaiar, com dimensões adequadas à do equipamento a utilizar.

Os provetes a ensaiar devem ser acondicionados e os ensaios devem ser conduzidos nas atmosferas de ensaio definidas na norma ISO 554 (para geotêxteis e produtos relacionados $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa).

O equipamento de ensaio pode ser de dois tipos: pode possuir uma base rígida e lisa onde se coloca o geossintético, ou então, o geossintético pode ser colocado sobre o solo que enche uma caixa inferior.

Em qualquer dos casos, a caixa superior, que contém o solo que irá deslizar sobre o geossintético durante o ensaio, deverá ter dimensões internas mínimas de 0,300 m de comprimento, 0,300 m de largura e 0,050 m de profundidade, podendo esta última dimensão aumentar até sete vezes a dimensão máxima das partículas de solo.

A caixa inferior, caso exista, deverá ter dimensões internas mínimas de 0,400 m de comprimento, 0,325 m de largura e 0,050 m de profundidade, podendo esta última dimensão aumentar até sete vezes a dimensão máxima das partículas de solo.

O equipamento deve possuir um mecanismo que lhe permita inclinar uma superfície, levantando uma das suas extremidades cerca de 5% do comprimento da superfície por minuto. No início de cada ensaio essa superfície deve estar na horizontal.

O equipamento deve incluir dispositivos que permitam medir o deslocamento da caixa superior, parando o ensaio quando este exceder 0,050 m, a inclinação da superfície em relação à horizontal durante o ensaio e a força aplicada pelo sistema de pesos no solo que enche a caixa superior.

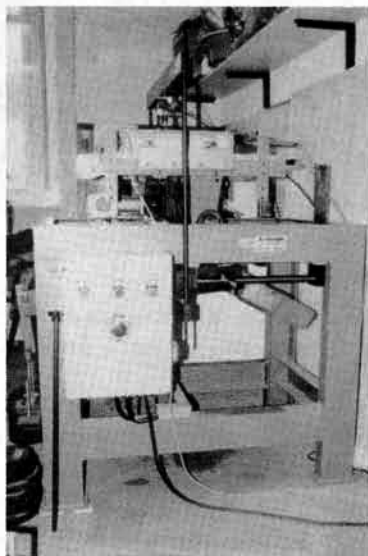
O geossintético deve estar fixo à superfície de apoio, de modo a evitar qualquer deslocamento relativo entre o geossintético e essa superfície.

3 – EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

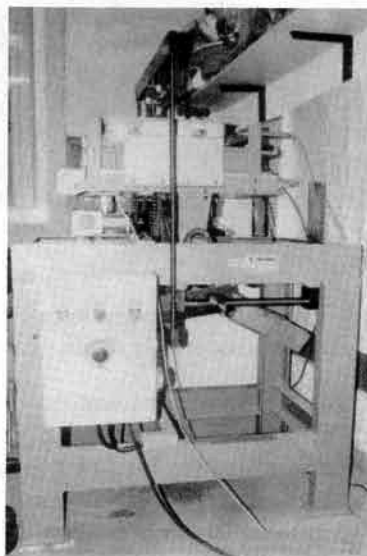
O equipamento de ensaio de corte em plano inclinado desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, para estudo dos fenómenos de interacção solo-geossintético, teve como base as orientações contidas na prEN ISO 12957-2.

O equipamento projectado e construído (Fig. 1), permite que o ensaio de corte em plano inclinado seja realizado de duas formas distintas:

- tipo 1) com o geossintético colocado sobre uma base rígida e lisa (Fig. 2a));
- tipo 2) com o geossintético colocado sobre o solo que enche uma caixa inferior (Fig. 2b)).

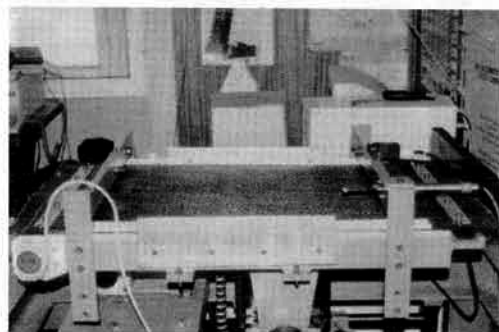


a)

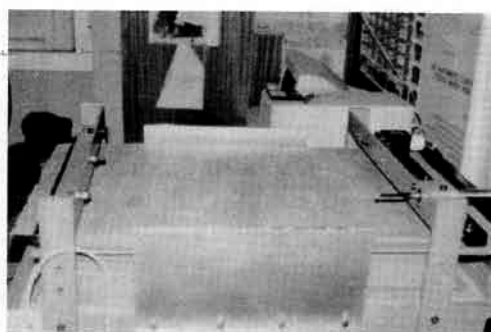


b)

Fig. 1 - Vistas laterais do equipamento de ensaio de corte em plano inclinado: a) com base rígida e caixa superior; b) com caixa inferior e superior.



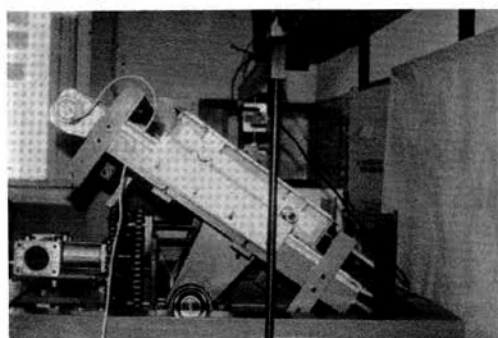
a)



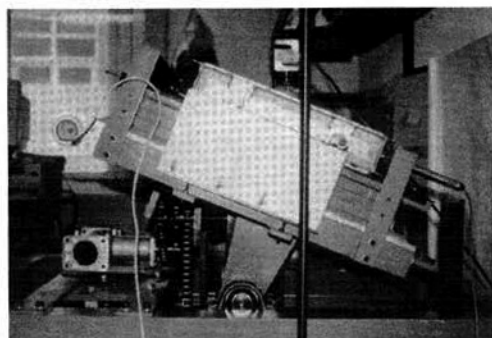
b)

Fig. 2 - Colocação do geossintético: a) base rígida; b) sobre o solo da caixa inferior.

Em ambos os casos a superfície onde o geossintético assenta, inicialmente horizontal, vai aumentando de inclinação a velocidade constante, induzindo o deslizamento do solo contido na caixa superior, ao longo da superfície de contacto com o geossintético (Fig. 3). Desta forma é possível avaliar a influência da rigidez da base de apoio do geossintético no comportamento da interface solo-geossintético.



a)

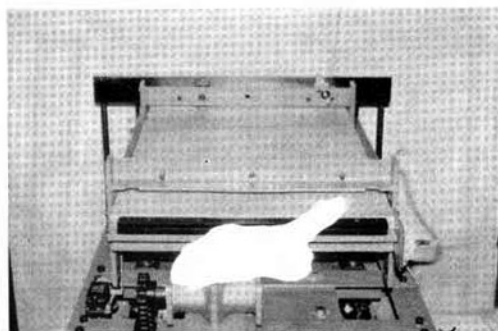


b)

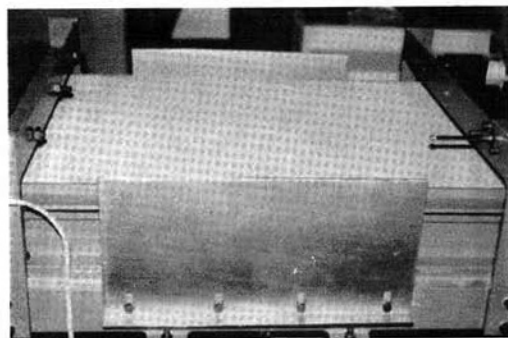
Fig. 3 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado. Vists laterais do sistema inclinado: a) com base rígida e caixa superior; b) com caixa inferior e superior.

Em traços gerais, o equipamento consta de uma estrutura desmontável composta por:

- uma base rígida e lisa com 0,620 m de comprimento, 0,430 m de largura e 0,010 m de espessura, onde se coloca o geossintético no caso do ensaio tipo 1 (Fig. 4a));
- uma caixa inferior rígida com dimensões interiores de 0,510 m de comprimento, 0,350 m de largura e 0,080 m de altura, que se enche com o solo onde se assenta o geossintético no caso do ensaio tipo 2 (Fig. 4b)), bastando para isso aparafusar esta caixa à base rígida;
- uma caixa superior rígida com dimensões interiores de 0,300 m de comprimento, 0,300 m de largura e 0,080 m de altura, que se enche com solo que durante o ensaio desliza sobre o geossintético (Fig. 5).

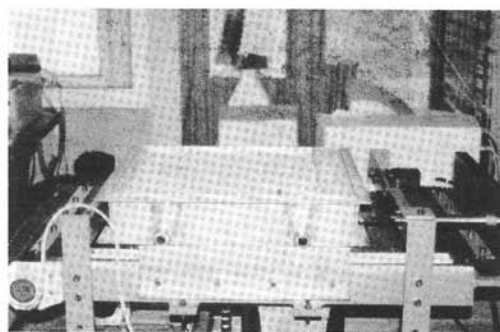


a)

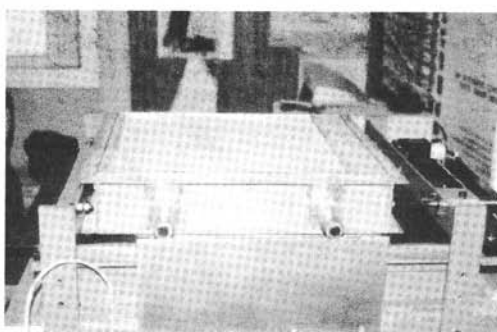


b)

Fig. 4 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado: a) base rígida; b) caixa inferior com solo.



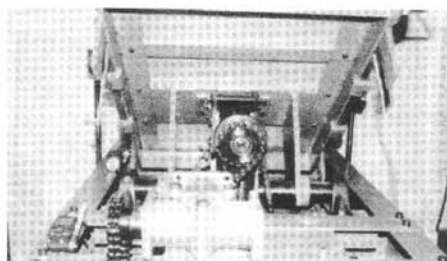
a)



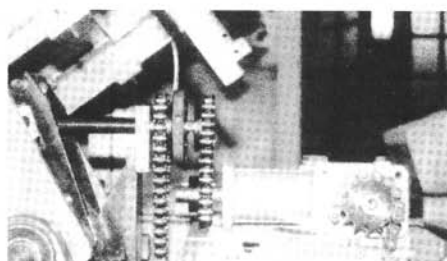
b)

Fig. 5 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado. Vistas laterais da caixa superior com solo: a) com base rígida e caixa superior; b) com caixa inferior e superior.

O equipamento possui um mecanismo (Fig. 6a)) que permite inclinar a base rígida a duas velocidades distintas: $0,5^\circ/\text{min}$, que corresponde à velocidade do ensaio, e $20^\circ/\text{min}$ (esta última velocidade é apenas utilizada no final do ensaio para levar a base à posição horizontal mais rapidamente). No início de cada ensaio a referida base tem de estar na horizontal. Para escolher uma ou outra velocidade basta mudar a posição do disco que se apresenta na Fig. 6b).



a)



b)

Fig. 6 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado: a) vista geral do mecanismo de controlo da velocidade; b) vista do disco de mudança de velocidade.

Ao mecanismo que inclina a base rígida estão associados dispositivos que, ao serem accionados, automaticamente impedem que a base continue a inclinar. Existem três dispositivos com funções distintas:

- um deles actua quando o movimento da caixa superior, que se encontra cheia de solo, excede os $0,050\text{ m}$, terminando assim o ensaio (Fig. 7a));
- os outros dois são dispositivos de segurança, um é accionado quando a base atinge a inclinação máxima que o equipamento permite (Fig. 7b)) e o outro quando a base, ao regressar à posição inicial, atinge a horizontal (Fig. 7c)).

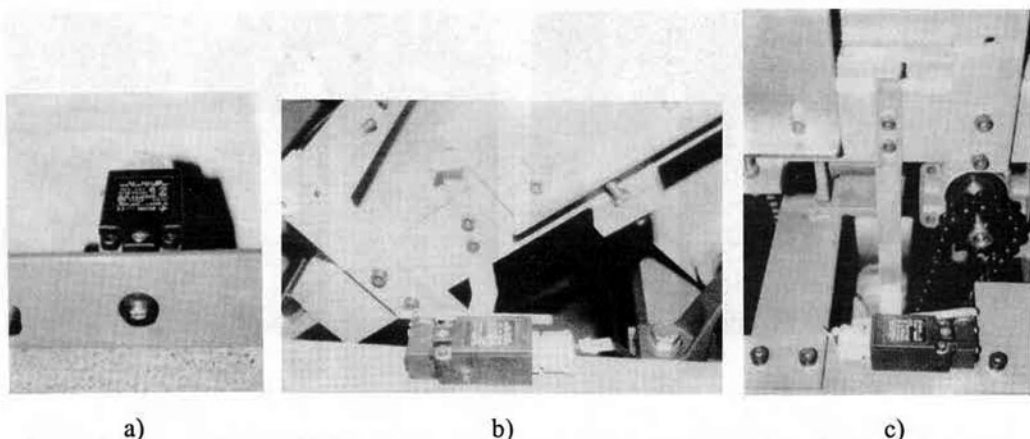


Fig. 7 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado: a) dispositivo de controlo do deslocamento máximo da caixa superior; b) dispositivo de segurança para a inclinação máxima da base; c) dispositivo de segurança para a horizontalidade da base.

O deslocamento da caixa superior em relação ao geossintético é medido durante o ensaio por intermédio de um transdutor (Fig. 8a)). O transdutor está colocado de forma a registar qualquer movimento da caixa, no início do ensaio está encostado à caixa, à medida que o ensaio decorre a caixa desloca-se contra o transdutor, que regista continuamente o valor desses deslocamentos (Fig. 8 b) a 8d)).

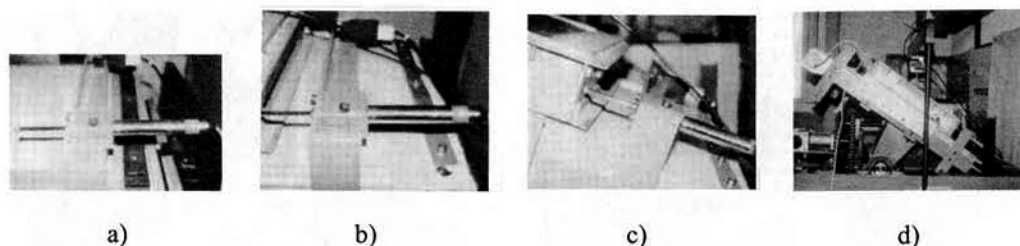


Fig. 8 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado: a) transdutor para medição dos deslocamentos da caixa superior; b) no início do ensaio; c) no decurso do ensaio; d) no fim do ensaio.

Como já foi dito, no início de cada ensaio a base rígida tem de estar na horizontal, inclinando progressivamente ao longo do ensaio. O valor dessa inclinação é medido através de um inclinómetro, que se encontra fixo à estrutura da base e que permite registar, durante o ensaio, o ângulo da base em relação à horizontal e, no início do ensaio verificar a horizontalidade da base (Fig. 9).

Em qualquer das metodologias de ensaio atrás referidas o mecanismo de fixação do geossintético consiste em duas barras, colocadas nas extremidades anterior e posterior do material, fixas à base de apoio por meio de parafusos (Fig. 10a)). Porém, no caso da colocação do geossintético sobre a base rígida (ensaio tipo 1), para melhorar a fixação do material são usadas mais duas barras laterais fixas à base de apoio do mesmo modo que as anteriores (Fig. 10b)).

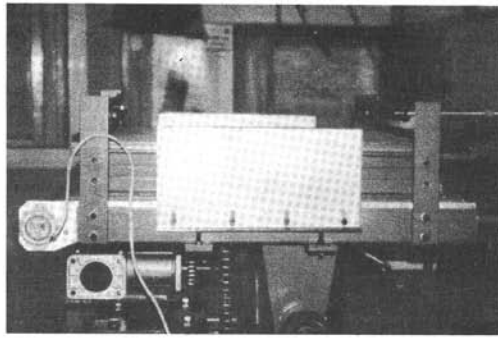
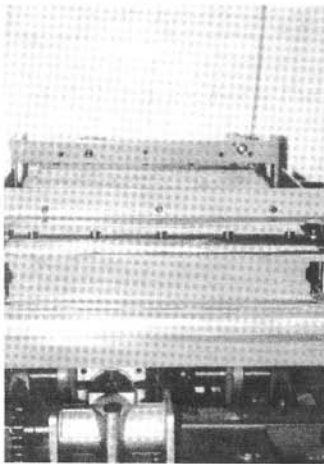
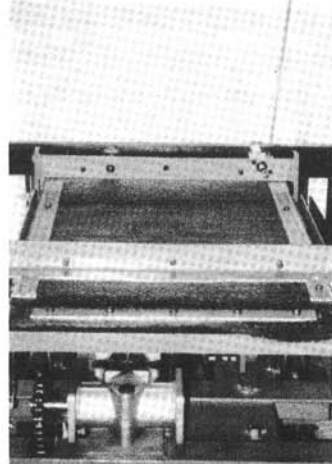


Fig. 9 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado - inclinómetro.



a)



b)

Fig. 10 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado – Barras de fixação do geossintético: a) ensaio tipo 2; b) ensaio tipo 1.

A caixa superior está preparada para receber o sistema de pesos usado para aplicar a força normal no solo, possuindo para o efeito uma tampa rígida que cobre toda a área interior da caixa e que garante que a força normal é aplicada uniformemente sobre a área do provete (Fig. 11).

A garantia de que a linha de acção da força normal passa pelo centro de gravidade da caixa superior quando a base está inclinada é dada através de duas cunhas inclinadas de 1:2 colocadas adjacentes às paredes frontal e posterior (Fig. 12). O interior da caixa é liso para reduzir o atrito entre o solo e as paredes da caixa.

A caixa superior desliza através de roletes sobre duas placas laterais fixas à estrutura da base (Fig.s 11 e 12). A altura das placas laterais depende da metodologia de ensaio adoptada. São estas placas que permitem ajustar o espaço entre a base da caixa superior e o provete de geossintético. Esse ajuste deve ser feito de modo a não permitir o contacto das paredes laterais da caixa com o geossintético, mas tendo a preocupação de minimizar a perda de solo durante o ensaio.

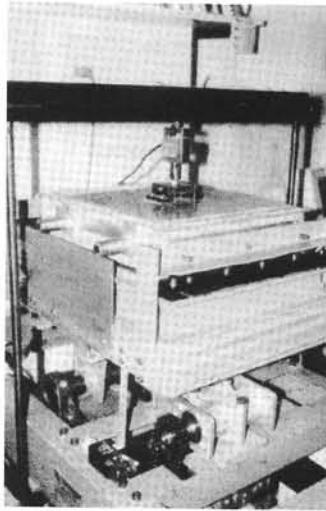


Fig. 11 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado – Sistema de aplicação da força normal.

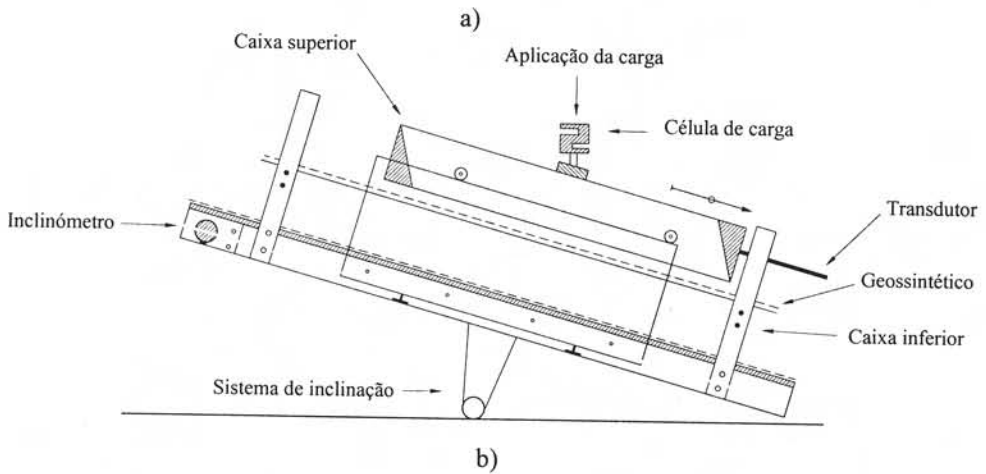
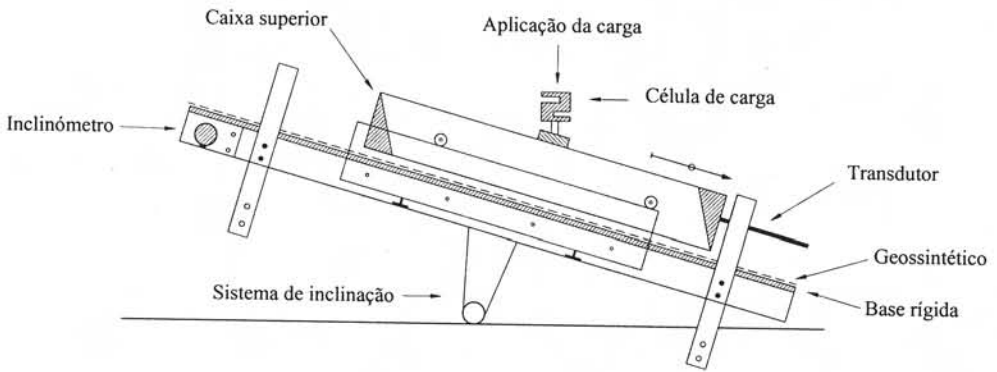


Fig. 12 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado – Representação esquemática: a) com base rígida e caixa superior; b) com caixas inferior e superior.

O sistema adoptado para aplicação da força normal no solo consiste na colocação de pesos suspensos na extremidade de uma alavanca (Fig. 13). Essa alavanca descarrega num pendural, por intermédio de um encaixe. A posição da barra inferior do pendural, onde está uma parte do encaixe, pode ser ajustada de acordo com o tipo de ensaio a realizar (Fig. 14). Por sua vez, o pendural transmite a força à tampa rígida que actua sobre o solo da caixa superior (Fig. 15). Quando os valores da força a aplicar não são muito elevados os pesos podem ser aplicados directamente na barra inferior do pendural (Fig. 16a)), ficando nesse caso a alavanca sem intervir (Fig. 16b)).

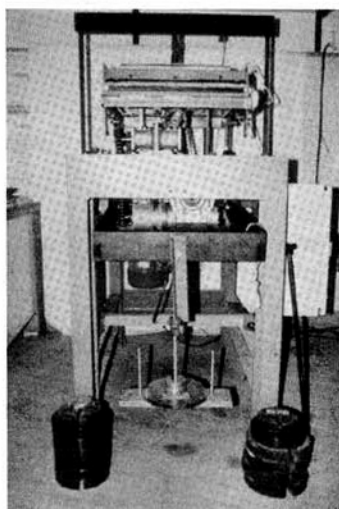
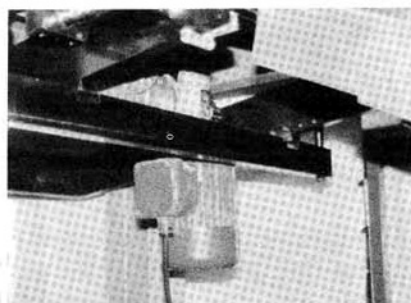
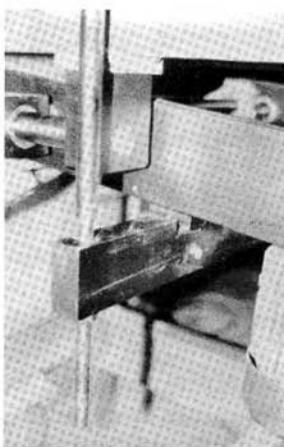


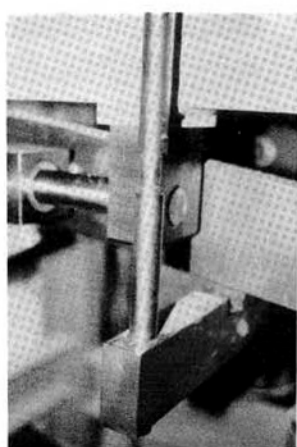
Fig. 13 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado – Sistema de aplicação da força normal.



a)



b)



c)

Fig. 14 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado – Sistema de aplicação da força normal – Regulação da posição da barra inferior do pendural.

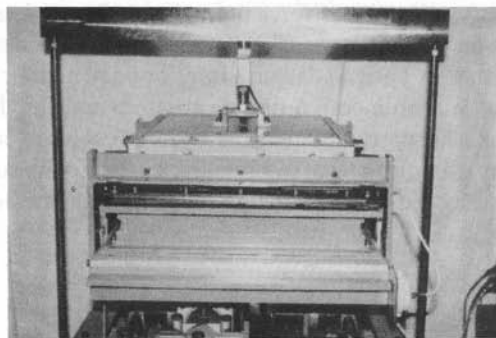
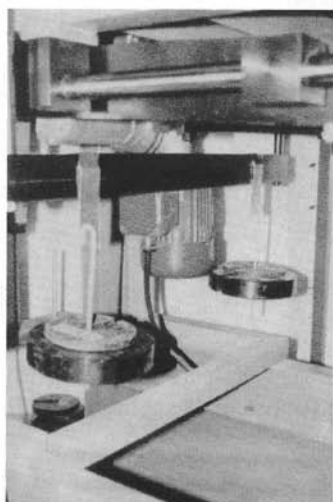
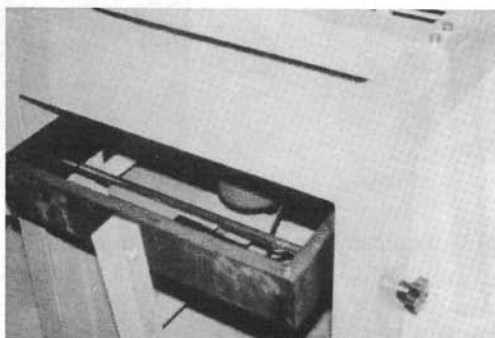


Fig. 15 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado – Sistema de aplicação da força normal – Transmissão da força à tampa rígida.



a)



b)

Fig. 16 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado – Sistema de aplicação da força normal: a) aplicação dos pesos directamente na barra inferior do pendural; b) vista da alavanca imobilizada.

A força normal aplicada deve ser tal que a tensão normal (ou, tensão de confinamento) seja a pretendida. A tensão de confinamento a aplicar em cada ensaio é seleccionada pelo utilizador, mantendo-se constante no decorrer do ensaio. Essa tensão de confinamento é medida através de uma célula de carga de compressão colocada entre o pendural e a tampa rígida (Fig. 17).

O registo dos valores medidos (pelo transdutor, pelo inclinómetro e pela célula de carga) é feito através de um sistema automático de aquisição de dados (Fig. 18). Esse sistema está ligado a um computador com “software” instalado adequado para este tipo de estudos, permitindo adquirir valores em ordem a várias grandezas (tais como: tempo, deslocamento, força, etc.). Neste trabalho optou-se pela aquisição de valores em ordem ao tempo.

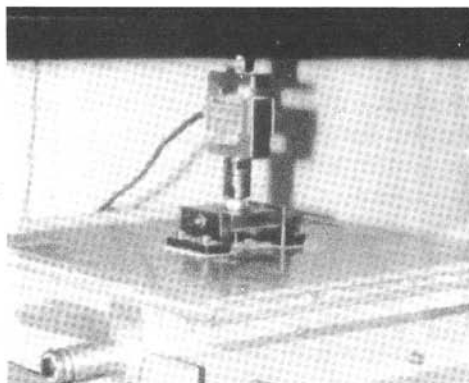


Fig. 17 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado – Sistema de aplicação da força normal – Célula de carga.

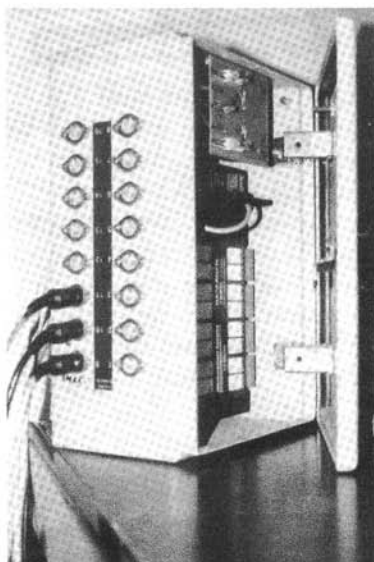


Fig. 18 - Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado – Caixa de aquisição de dados.

4 – PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Antes de se iniciar o estudo experimental com o equipamento de ensaio de corte em plano inclinado procedeu-se à calibração de todos os dispositivos intervenientes, ou seja, do transdutor, do inclinómetro e da célula de carga.

Por outro lado, verificou-se o funcionamento dos três dispositivos que ao serem accionados, impedem de imediato que a base continue a inclinar, tendo sido necessário efectuar alguns ajustes.

Para ter a certeza de que o atrito entre os roletes e as placas laterais onde apoiam é insignificante, verificou-se para que inclinação a caixa superior, quando vazia, começa a deslizar, tendo-se concluído que tal acontece para valores de inclinação muito reduzidos (inferiores a 1°), podendo, por isso, o referido atrito ser considerado desprezável.

Foi também medido, para incrementos sucessivos de inclinação de 5°, o valor da força que impede que a caixa superior, quando vazia, se desloque.

Tal como tem vindo a ser referido, o ensaio de corte em plano inclinado pode ser realizado de duas formas distintas.

Antes de realizar um ensaio propriamente dito é necessário executar uma série de tarefas que de seguida se descrevem.

As tarefas consistem na preparação da caixa, ou das caixas (conforme o tipo de ensaio), isto é, no(s) seu(s) enchimento(s) com o solo em causa e na colocação e fixação do provete do geossintético a ensaiar.

No ensaio tipo 1, começa-se por fixar o provete à base rígida, enquanto que no ensaio tipo 2, inicia-se a preparação do ensaio com o enchimento da caixa inferior com o solo em causa, seguindo-se então depois a colocação do provete sobre o solo e a sua fixação. Em ambos os casos deve haver a preocupação de colocar o provete esticado embora não tensionado.

No ensaio tipo 2, o solo é colocado na caixa inferior em camadas com 0,020 m de espessura após compactação. O solo correspondente a cada camada é vertido para a caixa de uma altura constante, em relação à última camada colocada, de 0,20 m. Em seguida, procede-se ao nivelamento e à compactação do solo até obter a compacidade desejada. Esta última tarefa é realizada utilizando um martelo de compactação leve com o qual são aplicadas, de uma altura de 0,050 m e de forma distribuída, 30 pancadas por camada.

Dadas as dimensões reduzidas da caixa, não é possível utilizar o gamadensímetro no controlo da compactação das camadas de solo. Como meio de solucionar este problema optou-se por medir o volume total da caixa e determinar o peso de solo que é necessário colocar para obter o peso volumico seco correspondente ao índice de compacidade pretendido. Feito isto, divide-se o peso total de solo necessário pelo número de camadas a colocar, obtendo-se, assim, o peso do solo a ser vertido por camada, quando o solo vertido, após compactação, ocupar a espessura de camada pré-definida pode-se considerar que o seu índice de compacidade é muito aproximadamente o pretendido.

Depois de fixar o provete de geossintético, coloca-se a caixa superior na posição que deve ocupar no início do ensaio. É nesta altura que se faz o ajuste do espaço entre a base da caixa superior e o provete, de modo a que as paredes laterais da caixa superior não contactem com o geossintético, para não influenciar os resultados do ensaio, mas tendo também a preocupação de minimizar a perda de solo durante o ensaio.

Feito o ajuste referido, procede-se ao enchimento da caixa superior, seguindo um procedimento em tudo semelhante ao que foi descrito para o enchimento da caixa inferior. Concluída esta tarefa coloca-se a tampa rígida sobre o solo e eleva-se o pendural, onde está fixa a célula de carga, de forma a posicioná-lo em cima dessa tampa, permitindo assim a actuação da força normal no solo.

Em seguida, seleccionam-se os pesos a aplicar de modo a que a força normal, e por conseguinte a tensão de confinamento seja a pretendida.

Finalmente, escolhe-se a velocidade de ensaio, verifica-se a horizontalidade da base, levando-se a zero o transdutor e o inclinómetro antes de iniciar o ensaio.

5 – MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO

5.1 - Solo

O solo utilizado no estudo tem partículas com dimensões que variam entre 0,074 mm e 2,00 mm (Fig. 19), peso volúmico mínimo de 15,0 kN/m³ e peso volúmico máximo de 17,9 kN/m³.

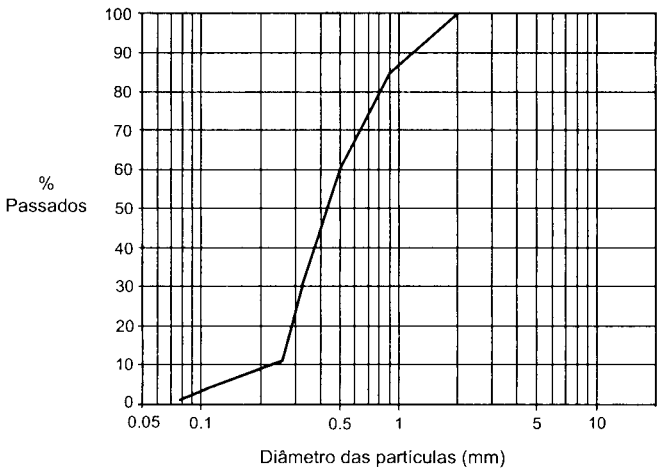


Fig. 19 - Curva granulométrica do solo.

No Quadro 1 encontram-se algumas das características do solo, nomeadamente, os diâmetros máximo, $D_{\text{máx}}$, e mínimo, $D_{\text{mín}}$, os diâmetros D_{10} , D_{30} , D_{50} e D_{60} , o coeficiente de uniformidade, C_u , o coeficiente de curvatura, C_c , os pesos volúnicos máximo, $\gamma_{\text{máx}}$, e mínimo, $\gamma_{\text{mín}}$ e o peso volúmico correspondente ao índice de compactidade de 50%, γ ($I_D=50\%$).

Os coeficientes referidos têm a seguinte definição:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{1}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \tag{2}$$

A caracterização do solo em causa passou também pela realização de ensaios de corte directo, determinando-se os ângulos de atrito do solo para um índice de compactidade de 50% (ver Quadro 1), uma vez que nos ensaios o solo foi compactado para este índice de compactidade.

5.2 – Geossintético

No estudo realizado utilizou-se uma geomembrana lisa, em polietileno de alta densidade e com 2 mm de espessura.

A geomembrana lisa foi ensaiada à tracção-deformação (Fig. 20) obtendo-se para a resistência à tracção e para a deformação, na rotura, valores médios de 31,84 N/mm² e 473,14%, respectivamente. O ensaio de tracção-deformação foi efectuado seguindo os procedimentos de ensaio constantes na norma ASTM D638.

Quadro 1 - Características granulométricas e físicas do solo.

D _{min}	D ₁₀	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D _{máx}	C _u	C _c	γ _{min}	γ _{máx}	γ _(I_D=50%)	φ ^(°)
(mm)						—		(kN/m ³)			36,2
0,074	0,18	0,30	0,43	0,53	2,00	2,94	0,94	15,00	17,90	16,32	

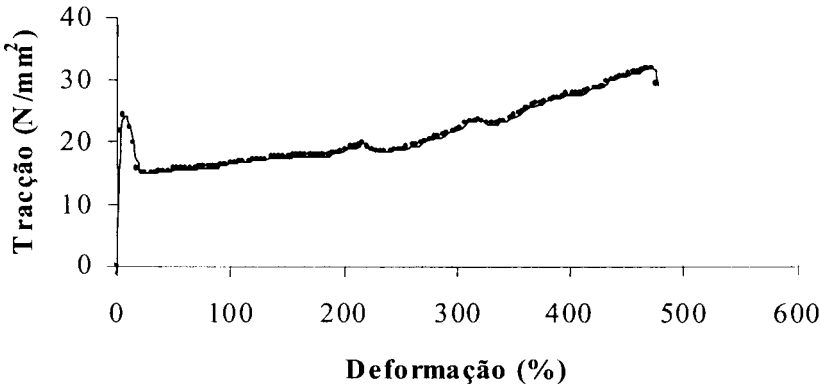


Fig. 20 - Curva tracção-deformação da geomembrana.

6 – METODOLOGIAS E CONDIÇÕES DE ENSAIO UTILIZADAS

No estudo efectuado os ensaios foram realizados de acordo com as duas metodologias descritas (isto é, com o geossintético colocado sobre uma base rígida e lisa (metodologia 1) e, com o geossintético colocado sobre o solo que enche uma caixa inferior (metodologia 2)) com o objectivo de concluir acerca da influência da metodologia de ensaio nos resultados.

As condições de ensaio seguidas são as apresentadas no Quadro 2. Cada ensaio foi efectuado sobre três provetes à temperatura de 20 ± 2°C e à humidade relativa de 65 ± 2%.

Quadro 2 – Condições de ensaio.

	I _D do solo (%)	Tensão de confinamento (kPa)	Metodologia de ensaio	Velocidade de ensaio (°/min)	Dimensões do provete comp./larg. (m/m)
Ensaio 1	50	10	1	0,5	0,70/0,43
Ensaio 2	50	10	2	0,5	0,60/0,36

7 – ANÁLISE DE RESULTADOS

A Fig. 21 mostra a evolução do deslocamento da caixa superior (que está cheia de solo) com o aumento da inclinação da base rígida para os três provetes da geomembrana lisa ensaiados nas condições descritas.

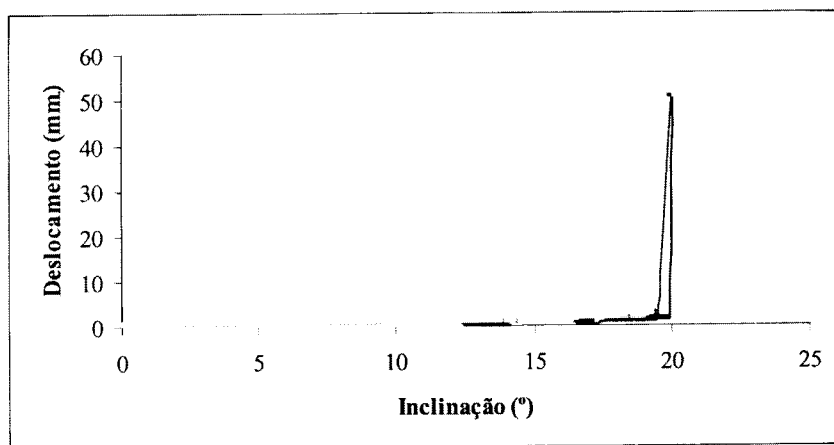


Fig. 21 - Evolução do deslocamento da caixa superior com o aumento da inclinação da base rígida para os três provetes da geomembrana lisa.

Estes resultados procuram, por um lado, expressar a repetibilidade do ensaio em termos da inclinação máxima atingida durante o ensaio (ou seja, a inclinação a que corresponde um deslocamento de 50 mm) e, por outro, evidenciar o tipo de informação disponibilizada pelo ensaio de corte em plano inclinado.

No que se refere à repetibilidade do ensaio pode-se dizer que, em termos de inclinação máxima atingida durante o ensaio, é boa, já que nos ensaios dos três provetes se observa uma variação máxima no valor do parâmetro em causa de cerca de 3,3%, sendo a variação mínima de 0,3% e a outra de 3,0%.

No que diz respeito à informação que se pode obter através do ensaio de corte em plano inclinado, ela consiste na evolução do deslocamento da caixa superior com o aumento da inclinação da base rígida. Quando o deslocamento atinge os 50 mm está definida a inclinação máxima. O valor dessa inclinação, designado por β , corresponde ao ângulo de deslizamento da caixa superior.

Vai-se agora proceder ao cálculo do ângulo de atrito da interface solo-geossintético, designado por ϕ_{sg} (ver Fig. 22).

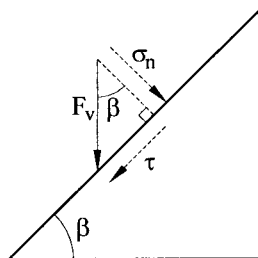


Fig. 22 - Esquema do sistema de forças aplicadas.

Começa-se por calcular o valor da tensão normal (σ_n) no momento do deslizamento, ou seja, quando a inclinação da base é igual a β usando a expressão:

$$\sigma_n = \frac{F_v \times \cos \beta}{1000 \times A} \tag{3}$$

onde:

- σ_n = tensão normal quando a inclinação da base é igual a β , em kPa;
- F_v = força vertical que actua na interface solo-geossintético, em N;
- A = área de contacto solo-geossintético, em m²;
- β = ângulo de deslizamento da caixa superior, em graus;
- Segue-se o cálculo da tensão de corte (τ) ao longo da superfície de deslizamento, utilizando a expressão:

$$\tau = \frac{F_v \times \text{sen}\beta + f_{(\beta)}}{1000 \times A} \tag{4}$$

onde:

- τ = tensão de corte ao longo da superfície de deslizamento, em kPa;
- $f_{(\beta)}$ = força necessária para impedir o movimento da caixa superior vazia quando a base está inclinada de β , aplicada na direcção da superfície de deslizamento e expressa em N;
- F_v , A e β têm o significado apresentado para a expressão (3).
- Por fim, calcula-se o ângulo de atrito da interface solo-geossintético (ϕ_{sg}) da seguinte forma:

$$\text{tg}\phi_{sg} = \frac{\tau}{\sigma_n} \Rightarrow \phi_{sg} = \text{arctg} \frac{\tau}{\sigma_n} \tag{5}$$

Os resultados do ensaio devem ser expressos em termos do valor médio obtido para o ângulo de atrito da interface solo-geossintético nos três provetes que o constituem, devendo também ser definido o desvio padrão.

Aplicando a metodologia de cálculo apresentada ao ensaio de corte em plano inclinado em consideração obtém-se os resultados apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Resultados do ensaio de corte em plano inclinado (metodologia 1).

Provetes	$\beta(^{\circ})$	F_v (N)	A (m ²)	σ_n (kPa)	$f(\beta)$ (N)	τ (kPa)	τ/σ_n	$\phi_{sg} (^{\circ})$
1º provete	20,06	900	0,09	9,39	26,29	3,72	0,40	21,62
2º provete	20,00	900	0,09	9,40	26,22	3,71	0,39	21,55
3º provete	19,41	900	0,09	9,43	25,49	3,61	0,38	20,93
Média	19,82°						Média	21,36°
D.padrão	0,36°						D.padrão	0,38°
C.variação	1,81%						C.variação	1,79%

Merece especial atenção a determinação de $f_{(\beta)}$, que se define como a força necessária para impedir o movimento da caixa superior vazia quando a base está inclinada de β . De facto, é necessário ter em atenção que o peso da própria caixa tem de ser contabilizado no cálculo da tensão de corte, uma vez que constitui uma componente adicional para a força exercida ao

longo da superfície de deslizamento. Visto ser imprescindível entrar em linha conta com a sua contribuição foi medido, para incrementos sucessivos de 5° no valor da inclinação, o valor da respectiva força (aplicada na direcção da superfície de deslizamento) que impede que a caixa superior quando vazia se desloque, obtendo-se desta forma o conjunto de valores de $f_{(\beta)}$ apresentados no Quadro 4.

Os valores de $f_{(\beta)}$ correspondentes a ângulos β situados entre os valores expressos no Quadro 4 são obtidos por interpolação linear.

Quadro 4 - Valores de $f_{(\beta)}$ em função do ângulo β .

β (°)	5	10	15	20	25	30
$f(\beta)$ (N)	6,21	13,45	20,00	26,22	32,43	38,30

Note-se que no caso da tensão normal esta questão não se põe, isto deve-se ao facto da caixa superior possuir roletes que apoiam em placas laterais, descarregando nelas a componente normal do seu peso, não a transmitindo assim à superfície da interface solo-geossintético, como acontece com a sua componente tangencial que actua na direcção da superfície de deslizamento.

Como se constata da análise do Quadro 3 o valor médio obtido para o ângulo de atrito da interface solo-geossintético nos três provetes ensaiados segundo a metodologia de ensaio 1 é de 21,36 °, sendo o desvio padrão de 0,38 °.

Na Fig. 23 compara-se a evolução do deslocamento da caixa superior com o aumento da inclinação da base para as duas geomembranas, quando ensaiadas pela metodologia 1 e pela metodologia 2.

Os resultados obtidos no ensaio de corte em plano inclinado da geomembrana lisa, quando ensaiada pela metodologia 2, apresentam-se no Quadro 5.

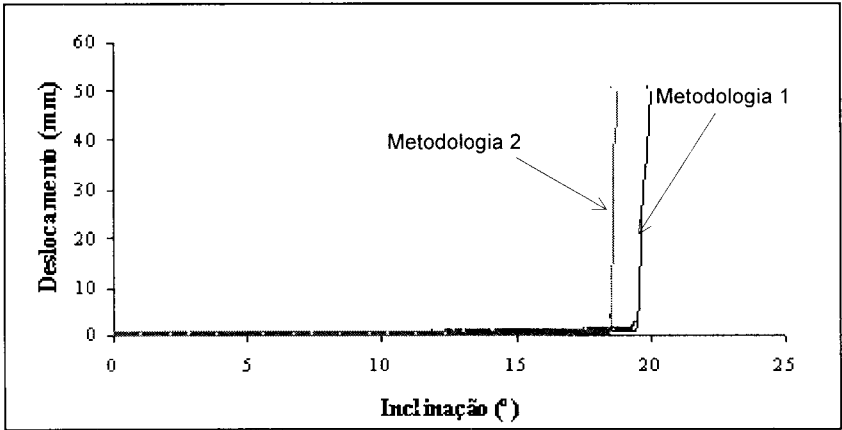


Fig. 23 - Evolução do deslocamento da caixa superior com o aumento da inclinação da base – influência da metodologia de ensaio.

Como se constata da análise dos Quadros 3 e 5 o valor médio obtido para o ângulo de atrito da interface solo-geossintético nos três provetes ensaiados da geomembrana lisa é de 21,36° e 20,57°, respectivamente para as metodologias de ensaio 1 e 2. Verifica-se que a sensibilidade das geomembranas lisas à metodologia de ensaio é pequena, registando-se uma

diminuição de cerca de 3,7% quando o ensaio é conduzido de acordo com a metodologia de ensaio 2.

Quadro 5 - Resultados do ensaio de corte em plano inclinado (metodologia 2).

Provetes	$\beta(^{\circ})$	F_v (N)	A (m^2)	σ_n (kPa)	$f(\beta)$ (N)	τ (kPa)	τ/σ_n	$\phi_{sg} (^{\circ})$
1º provete	17,68	900	0,09	9,53	23,33	3,30	0,35	19,08
2º provete	18,74	900	0,09	9,47	24,65	3,49	0,37	20,21
3º provete	20,81	900	0,09	9,35	27,23	3,86	0,41	22,41
Média	19,08°						Média	20,57°
D.padrão	1,59°						D.padrão	1,69°
C.variação	8,34%						C.variação	8,23%

8 – CONCLUSÕES

No trabalho apresentado descreveu-se um equipamento de ensaio desenvolvido para determinação da resistência ao corte das interfaces solo-geossintético em taludes. A fiabilidade do equipamento de ensaio foi comprovada através da repetibilidade do ensaio. Por outro lado, verificou-se ser a influência nos resultados da metodologia de ensaio seguida negligenciável quando o geossintético que faz interface com o solo é uma geomembrana lisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar os seus agradecimentos pelo patrocínio e apoio financeiro ao FEDER e Programa PRAXIS XXI, no âmbito do projecto de investigação 3/3.1/CEG/2598/95.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Pinho Lopes, M. J. F. *Estudo da influência da granulometria do solo e da estrutura do reforço nos mecanismos de interacção solo-geossintético*. Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, Porto, 197p., 1998.