

# COMPORTAMENTO TENSÃO-DESLOCAMENTO DE CORTE DO SOLO MICROREFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

## SHEAR STRESS-DISPLACEMENT BEHAVIOUR OF MICROREINFORCED SOIL WITH POLYPROPYLENE FIBRES

Falorca, I. M. C. F. G., *Dep. de Eng. Civil, Universidade da Beira Interior, Portugal,*  
*ifalorca@ubi.pt*

Pinto, M. Isabel M., *Dep. de Eng. Civil, Universidade de Coimbra, Portugal,*  
*isabelmp@dec.uc.pt*

Ferreira Gomes, L. M., *Dep. de Eng. Civil, Universidade da Beira Interior, Portugal,*  
*lmfg@ubi.pt*

### RESUMO

Este trabalho descreve parte de um estudo experimental sobre o comportamento dos solos microreforçados com fibras de polipropileno de pequeno comprimento. Foi realizada uma série de ensaios de corte directo e de corte rotativo anelar usando uma areia não reforçada (controlo) e reforçada com fibras. Os resultados dos ensaios demonstram claramente que o comprimento das fibras e o nível de deformação são factores que influenciam o aumento da resistência ao corte do solo reforçado. A resistência ao corte aumenta com o acréscimo do comprimento das fibras e o maior incremento corresponde aos níveis de deformação mais altos. O principal mecanismo de reforço parece ser o atrito.

### ABSTRACT

This paper describes part of an experimental study that was carried out to study the behaviour of microreinforced soils with discrete, randomly oriented short polypropylene fibres. A series of direct shear and ring shear tests was carried out on two types of soils, both unreinforced (control) and fibre-reinforced, and the results analyzed. The results clearly indicate that the increase in shear strength is function of fibre length and deformation level. The increase in shear strength increases with the increase of fibre length and the higher increase corresponds to the higher shear displacement values. The study also seems to indicate that the main reinforcing mechanism is the frictional resistance.

### 1. INTRODUÇÃO

O microreforço do solo é obtido através da mistura otimizada de solo com elementos de reforço de pequena dimensão dispersos uniformemente de modo aleatório, constituindo um sistema de reforço tridimensional do solo. Os elementos de reforço podem apresentar diversas formas e podem ser constituídos por materiais naturais ou materiais sintéticos. Também podem ser usados materiais reciclados, desde que não representem perigo de contaminação para o meio ambiente [1], [2], [3]. O material compósito resultante é em geral sinergicamente mais resistente e pode ser obtido a menor custo.

O polímero mais usado no fabrico das fibras para geotêxteis é o polipropileno (cerca de 85%) [4], facto que tem vindo a merecer a atenção de alguns investigadores na área da Geotecnia. O presente artigo descreve parte de um estudo laboratorial sobre a utilização de fibras de polipropileno no reforço dos solos. O principal objectivo do estudo é investigar o efeito de

reforço das fibras no comportamento tensão-deformação de corte dos solos. Os objectivos específicos do estudo que se apresenta consistem em investigar a influência das propriedades das fibras (comprimento) e das variáveis do ensaio (nível de deformação). Para mais informações acerca do estudo levado a cabo neste novo material, podem ser consultados os trabalhos [2], [3], [5], [6], [7].

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiais

Foi estudado um solo arenoso, classificado como SP - areia mal graduada, de acordo com a Classificação Unificada de Solos [8]. As propriedades principais do solo estão indicadas no Quadro 1, e a curva granulométrica está representada na Figura 1.

Quadro 1 – Propriedades do solo

Propriedades	SP
Densidade das partículas sólidas, $G_s$	2,65
% Partículas de diâmetro < 0,074 mm	0
Diâmetro médio das partículas, $D_{50}$ (mm)	0,57
Coefficiente de uniformidade, $C_U$	3,45
Limite de liquidez, $W_L$ (%)	Não Plástico
Índice de plasticidade, $I_p$ (%)	Não Plástico
Ângulo de atrito interno, $\phi'$ (°)	39,5
Coesão, $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	0

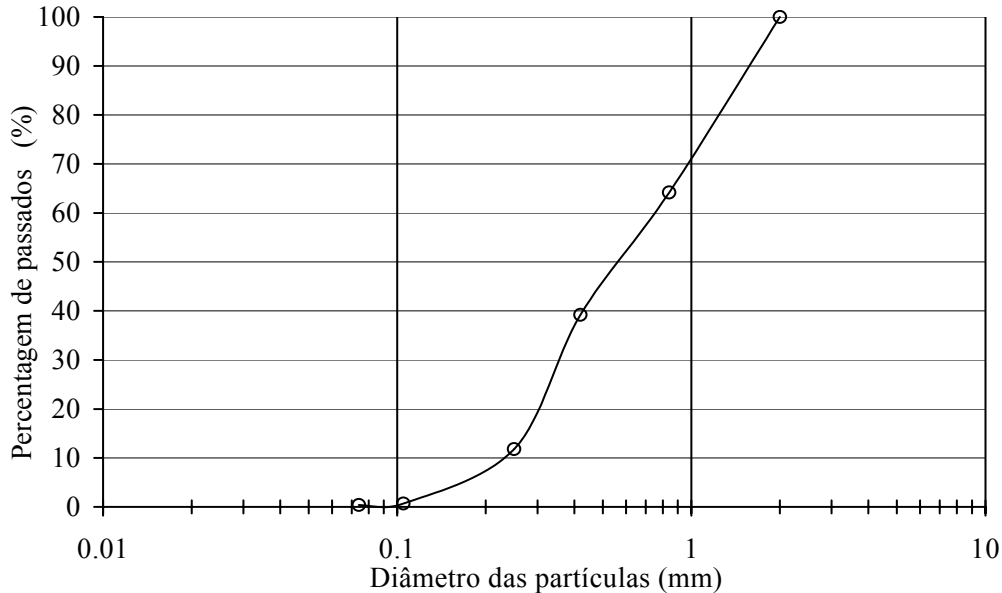


Figura 1 – Curva granulométrica do solo estudado.

As fibras de polipropileno (PP) utilizadas no programa experimental foram disponibilizadas por uma indústria local, que as utiliza para o fabrico de geotêxteis não tecidos agulhados. As propriedades mais importantes estão resumidas no Quadro 2. As propriedades mecânicas foram determinadas através de ensaios laboratoriais de tracção das fibras de acordo com a NP EN ISO 5079 [9] com velocidade de deformação de 1 mm/min. As propriedades físicas foram fornecidas

pelo fabricante. O diâmetro das fibras correspondente a 6 Denier é da ordem de 0,031 mm. Na investigação realizada foram utilizadas fibras com comprimentos nominais de 25, 50 e 100 mm. Foi utilizada uma percentagem de fibras de 0,5 % para reforçar a areia. A percentagem de fibras foi seleccionada a partir de estudos realizados e descritos anteriormente [2], [3], [5], nos quais se conclui que o aumento da resistência ao corte é função da percentagem das fibras, e a percentagem óptima se situa entre 0,5 % e 1 %. A percentagem de fibras, FP, é determinada em relação ao peso do solo seco.

Quadro 2 – Propriedades das fibras de polipropileno

Propriedades	Fibras PP
Densidade, $G_f$	0,91
Denier (g/9 000 m)	6
Resistência à tracção, $\sigma_T$ (MN/m <sup>2</sup> )	200
Módulo de deformabilidade, E (GN/m <sup>2</sup> )	1,5
Extensão na rotura, $\varepsilon_r$ (%)	300
Absorção de água (%)	0
Coloração	branco

## 2.2 Preparação das amostras

A preparação das amostras reforçadas seguiu procedimentos especiais, cuja descrição detalhada pode ser consultada em [2] e [3], devido à grande facilidade de ocorrência de segregação das fibras. É do conhecimento geral que a qualidade dos resultados dos ensaios depende fortemente da uniformidade das amostras, neste caso das misturas. As fibras foram misturadas nos solos manualmente, por ser esta a técnica que em Laboratório permitiu uma distribuição mais uniforme das fibras nos solos e com orientação mais aleatória. O solo foi previamente humedecido, tendo sido misturado e ensaiado com um teor em água de cerca de 5%. As amostras de solo não reforçado foram ensaiadas com o mesmo teor em água das amostras reforçadas.

## 2.3 Ensaios

Neste estudo, além dos ensaios necessários à caracterização dos materiais, relativos ao conteúdo dos Quadros 1 e 2, foram realizados ensaios de corte directo e de corte rotativo anelar.

### 2.3.1 Ensaios de corte directo

O aparelho de corte directo, com caixa quadrada de 60 mm de lado, permite estudar amostras com uma espessura de cerca de 20 mm. Os ensaios de corte directo decorreram sob deslocamento de corte constante, com velocidade de 1 mm/min. A extensão máxima atingida foi a permitida pelo equipamento que é de cerca de 17%.

### 2.3.2 Ensaios de corte rotativo anelar

Os ensaios de corte rotativo anelar decorreram sob deslocamento de corte constante, com velocidade de cerca de 1 mm/min. O aparelho de corte rotativo permite estudar amostras com forma anelar, com um diâmetro interno de 70 mm e um diâmetro externo de 100 mm, como mostra a Figura 2. Este ensaio de corte, por ser rotativo, tem duas grandes vantagens em relação ao ensaio de corte directo [10]:

- a amostra pode ser sujeita a deslocamentos unidireccionais tão grandes quanto o necessário, permitindo ao solo atingir o estado residual;
- a área que fica sujeita às cargas normais e às cargas de corte mantém-se com um valor constante durante todo o ensaio, o que permite uma avaliação mais correcta das tensões e consequentemente da resistência ao corte.

As amostras, com 7 mm de espessura, são carregadas verticalmente entre dois pratos que lhes permitem a drenagem e cujas superfícies são suficientemente rugosas de modo a impedirem o deslizamento entre os pratos de carga e a amostra. Para garantir um atrito alto entre os pratos porosos e o solo, foi decidido substituir os pratos de origem, quer o superior quer o da base, por outros de rugosidade significativamente maior.

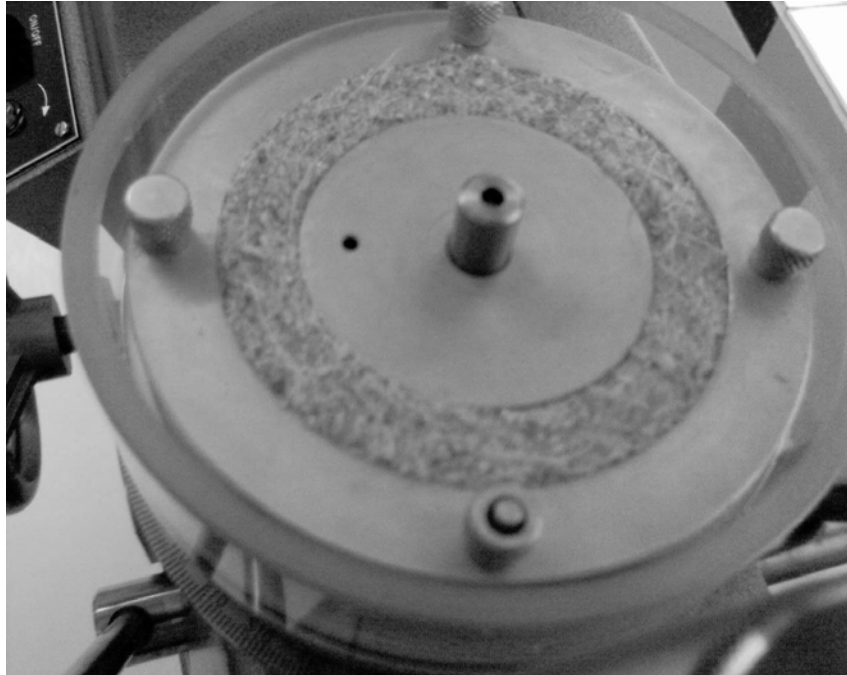


Figura 2 – Amostra de areia reforçada com fibras de 100 mm, preparada na célula de corte rotativo anelar.

### 2.3.3 Matriz de ensaios

Para investigar o efeito de alguns dos factores que parecem influenciar o aumento da resistência ao corte dos solos reforçados com fibras, tais como o comprimento das fibras e o nível de deformação, foram realizados vários ensaios, sempre planeados de modo a estudar separadamente o efeito de cada factor. O Quadro 3 mostra, de um modo sistemático, os ensaios realizados no âmbito dos objectivos do estudo que aqui se descreve. Estes ensaios pretendem apenas ser ensaios indicadores do comportamento dos solos reforçados com fibras, não existindo, por enquanto, qualquer a intenção de simular determinadas condições reais em obra.

## 3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de corte realizados no âmbito deste trabalho demonstram claramente que o comportamento do solo reforçado com fibras de polipropileno é significativamente diferente do comportamento do solo não reforçado e que o comprimento das fibras e o nível de deformação são factores que influenciam o aumento da resistência ao corte do solo reforçado.

Quadro 3 – Matriz de ensaios

		Ensaio de corte directo	Ensaio de corte rotativo
Série de ensaios	Comprimento das fibras (mm)	$\sigma_N'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_N'$ (kN/m <sup>2</sup> )
Areia não reforçada	-	8,27	57,72
		15,08	
		28,70	
		55,94	
		110,43	
		219,39	
Areia reforçada com 0,5% de fibras	25	328,36	57,72
		110,43	
		219,39	
	50	328,36	-
		8,27	
		15,08	
		28,70	
		55,94	
		110,43	
100	219,39	57,72	
	110,43		
	328,36		

### 3.1 Ensaios de corte directo

A variação da resistência ao corte com o deslocamento de corte, bem como a variação da espessura das amostras (traduzida pelo movimento vertical medido no topo das amostras) está ilustrada na Figura 4, que representa os resultados típicos obtidos nos ensaios de corte directo.

O solo não reforçado mostra um comportamento tensão-deslocamento de corte típico e já bem conhecido. O solo reforçado mostra um comportamento totalmente distinto, uma vez que a resistência aumenta continuamente até à máxima deformação permitida pelo equipamento de corte, não chegando, em geral, a atingir um valor constante. Observa-se que a resistência desenvolvida na areia reforçada quando sujeita a pequenas deformações de corte é, em geral, ligeiramente inferior à desenvolvida pela areia não reforçada, para o mesmo deslocamento. Resultados semelhantes foram descritos por outros investigadores [11], [12], [13], [14], [15].

Este comportamento parece resultar do facto de a areia reforçada ter uma porosidade inicial superior à da areia não reforçada, uma vez que se observou que, embora o diâmetro das fibras seja de duas ordens de grandeza inferior ao diâmetro médio das partículas da areia, as fibras não ocupam apenas os espaços vazios mas ocupam também o espaço entre as partículas de areia, contribuindo para o afastamento destas. O fenómeno é mais acentuado quando se utilizam fibras de 50 mm, uma vez que, para a mesma percentagem de fibras, o número de fibras na secção de corte é superior ao das amostras reforçadas com fibras de 100 mm. Verifica-se que a porosidade inicial diminui em consequência do deslocamento de corte, tal como acontece nas areias soltas, e as fibras são mobilizadas gradualmente. Este comportamento parece indicar que a resistência

ao corte dos solos reforçados é devida ao atrito. A diminuição da porosidade inicial devido ao deslocamento de corte permite aumentar a área de contactos sólidos e melhorar a resistência por atrito do solo reforçado. Sob o ponto de vista da Mecânica dos Solos, o mecanismo de reforço principal parece ser o atrito mobilizado entre as fibras e as partículas de solo.

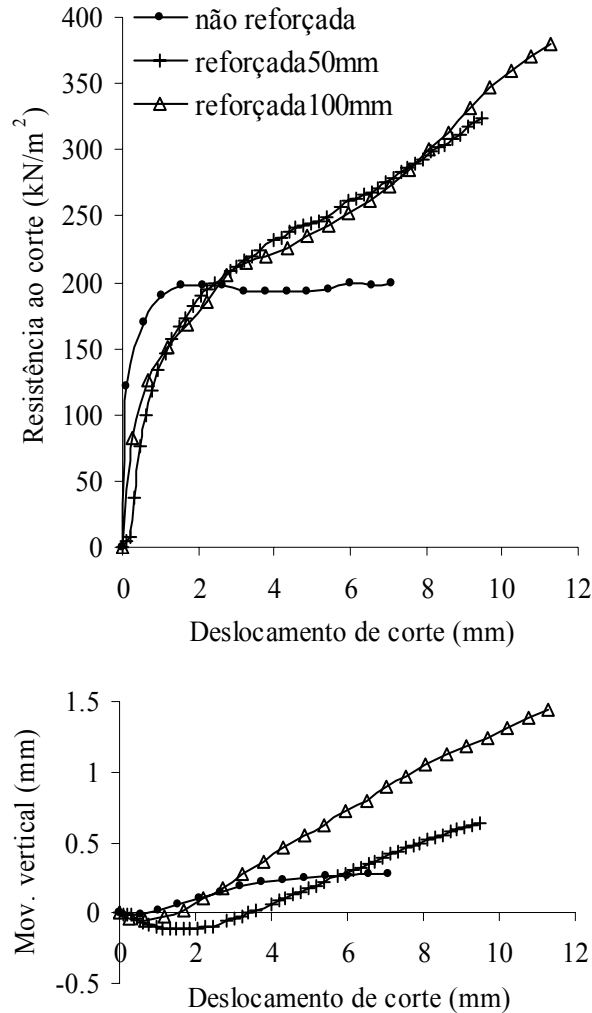


Figura 4 – Variação da resistência ao corte e do movimento vertical com o deslocamento de corte, sob uma tensão normal de 219,39 kN/m<sup>2</sup>, da areia não reforçada e reforçada.

Relativamente ao movimento vertical também se verificam diferenças significativas. A areia reforçada é significativamente mais dilatante do que a areia não reforçada, talvez porque as fibras, ao serem tracionadas, soltam as partículas fortemente imbricadas, o que faz aumentar a espessura da zona de solo mobilizado por corte e consequentemente o volume da amostra. A Figura 4 mostra que a dilatância depende do comprimento das fibras, correspondendo uma maior dilatância aos maiores comprimentos das fibras.

Foi definido o valor da resistência ao corte máxima com base num critério de limitação da deformação, à semelhança de outros investigadores [2], [12], [16], e considerada a resistência desenvolvida para uma deformação de 15%. Representando esta resistência em função do comprimento das fibras, como mostra a Figura 5, torna-se mais evidente o efeito do comprimento das fibras no aumento da resistência ao corte do solo.

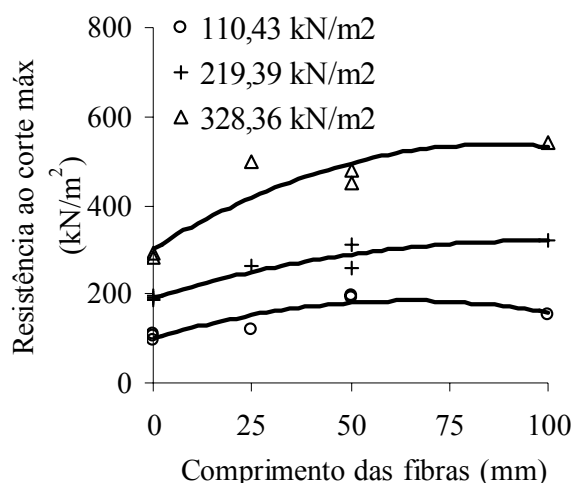


Figura 5 – Variação da resistência ao corte máxima com o comprimento das fibras.

Os resultados mostram que, aumentando o comprimento das fibras, aumenta o incremento de resistência ao corte do solo reforçado. O incremento da resistência ao corte cresce mais rápido quando as tensões normais são maiores e o comprimento das fibras é menor. Para além de determinado valor do comprimento das fibras o aumento do incremento de resistência ao corte do solo reforçado deixa de ser significativo. Este comportamento parece indicar, mais uma vez, que a resistência ao corte dos solos reforçados é devida ao atrito. A razão pode ser atribuída à distribuição das fibras na secção de corte. O número de fibras com 100mm de comprimento é muito menor do que o número de fibras com comprimentos menores, para a mesma percentagem de fibras. O número de fibras que intersecta o plano de corte é muito importante, segundo Benson e Khire [17], que o consideraram mesmo mais importante que a grandeza da tensão de tracção mobilizada em cada fibra.

O fenómeno também pode ser atribuído ao facto das fibras terem um comprimento superior ao máximo deslocamento de corte permitido pelo equipamento, e no caso das fibras de 100 mm, este ser um comprimento superior à largura da caixa de corte. Neste caso a deformação necessária para mobilizar a resistência ao corte máxima aumenta, uma vez que as fibras, muito provavelmente, não são colocadas esticadas. Tendo em conta esta limitação da caixa de corte directo para estudar o comportamento tensão-deslocamento de corte total, que inclui o valor de pico e também o valor residual atingido depois de grandes deformações relativamente ao comprimento das fibras, foi feito um pequeno estudo utilizando o aparelho de corte rotativo anelar.

### 3.2 Ensaios de corte rotativo anelar

Os resultados obtidos nos ensaios de corte rotativo anelar encontram-se representados na Figura 6. A variação do coeficiente de atrito com o deslocamento de corte mostra que o maior incremento da resistência ao corte corresponde ao solo reforçado com fibras de maior comprimento. Comparando o comportamento tensão-deslocamento de corte do solo durante o ensaio de corte rotativo com o previamente observado no ensaio de corte directo, verifica-se uma grande semelhança entre os dois, até ao momento em que, no caso do ensaio de corte rotativo, o solo atinge um pico de resistência. Verifica-se que este pico ocorre sistematicamente para um determinado valor do deslocamento de corte, como se pode observar na Figura 6. Este facto pode indicar que as fibras atingiram a sua resistência à tracção ou que atingiram uma orientação preferencial (paralela à direcção de corte) e deixaram de contribuir para o aumento

da resistência ao corte dos solos. Contudo, o estudo ainda não é suficiente para concluir sobre a ligação que existe entre o momento de ocorrência do pico de resistência e a resistência à tracção ou orientação das fibras.

Após o pico, a resistência ao corte do solo reforçado diminui até atingir o mesmo valor da resistência ao corte do solo não reforçado e o seu volume mantém-se constante (ver Figura 6). Observa-se uma forte relação entre o aumento da resistência ao corte dos solos e a dilatância: deixa de haver aumento de resistência ao corte após a dilatância diminuir ou tender para zero.

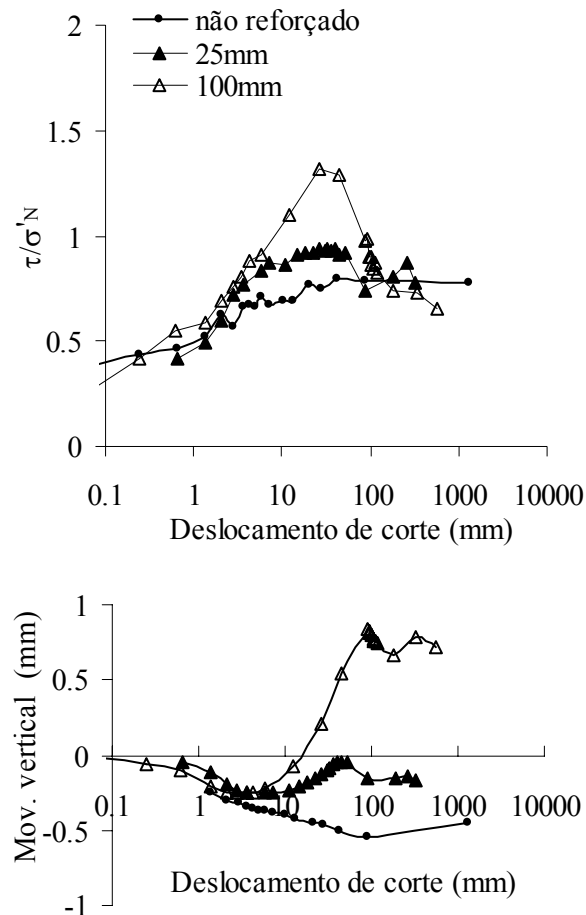


Figura 6 – Variação do coeficiente de atrito residual e do movimento vertical com o deslocamento de corte, sob uma tensão normal de  $57,72 \text{ kN/m}^2$ .

### 3.3 Outros aspectos do estudo experimental

As amostras de areia, reforçada e não reforçada, não sofreram o problema típico da perda de solo durante o corte, mesmo para valores altos do deslocamento, como mostra a Figura 7. A perda de solo durante o corte é habitualmente uma causa de erro a ter em conta na análise dos resultados do ensaio de corte rotativo anelar em solos finos assim como a variação do volume (traduzida pelo movimento vertical do prato superior). A perda de solo através do espaço entre o prato superior e os anéis confinantes, pode condicionar a dimensão máxima das partículas a serem ensaiadas [10]. As observações efectuadas durante o ensaio de corte rotativo anelar da areia reforçada e não reforçada indicam que não há necessidade de dar atenção especial a estes factores na análise dos resultados.



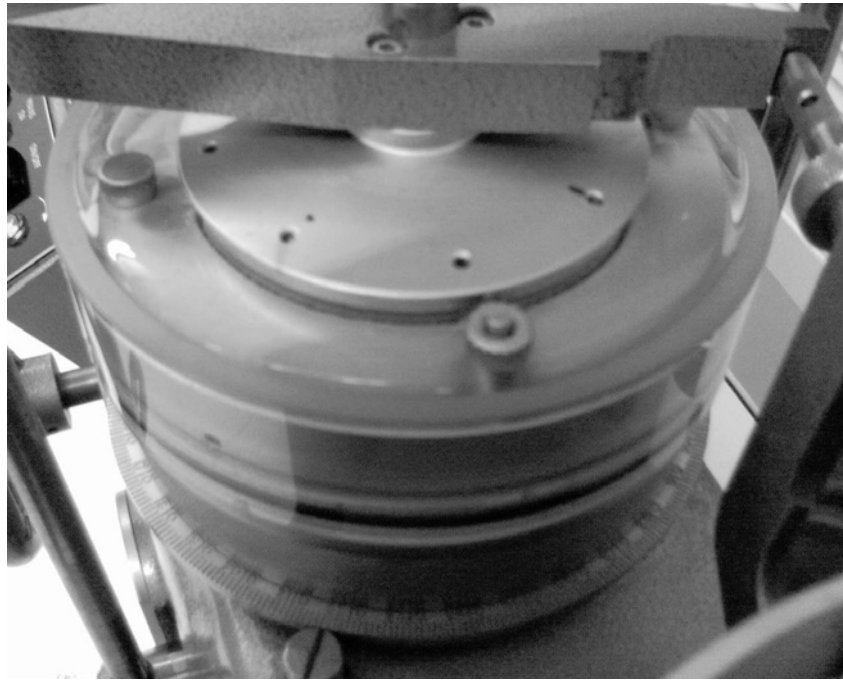


Figura 7 – Ensaio de corte rotativo anelar da areia ao fim de 1m de deslocamento de corte.

#### **4. CONCLUSÕES**

Com base no estudo experimental apresentado e na análise dos resultados, conclui-se que o comportamento dos solos reforçados com fibras de polipropileno é significativamente diferente do comportamento dos solos não reforçados e que o comprimento das fibras e o nível de deformação são factores que influenciam o aumento da resistência ao corte do solo reforçado. As conclusões específicas do estudo apresentado são as seguintes:

1. A resistência ao corte aumenta com o aumento do comprimento das fibras. O comprimento das fibras é importante no sentido de mobilizar um maior volume de material na zona de corte.
2. Aumentando o deslocamento de corte aumenta a resistência ao corte dos solos reforçados, devido à dilatância. Existe uma forte relação entre o aumento da resistência ao corte dos solos e a dilatância: quando a dilatância diminui ou tende para zero, a resistência ao corte deixa de aumentar.
3. O efeito de reforço traduz-se no desenvolvimento da resistência à tracção das fibras na área de contactos sólidos. O principal mecanismo de reforço parece ser o atrito.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à FCT e FEDER o apoio financeiro concedido através do Projecto PRAXIS/3/3.1/CEG/2598/95 e juntamente com o POCI 2010 através do Projecto POCI/ECM/59904/2004. Agradecem ainda à Carvalhos Lda., Lousã, Portugal, pelo fornecimento das fibras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pinto, M.I.M. (2000), "Micro-Reinforced Soil", Proceedings of the Third International Conference on Ground Improvement Techniques, Singapore, ISBN 981-04-2511-2, pp. 37-50.
- [2] Falorca, I.M.C.F.G. (2002), "Comportamento do solo microreforçado com fibras sintéticas de pequeno comprimento", Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, 185 p.
- [3] Falorca, I.M.C.F.G. e Pinto, M.I.M. (2004), "Solo reforçado com fibras sintéticas de pequeno comprimento distribuídas de modo aleatório", 2º Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia, Aveiro, Portugal, ISBN 972-789-114-4, pp. 471-480.
- [4] Koerner, R.M. (1999), "Designing with Geosynthetics", 4<sup>th</sup> edition, Prentice Hall, ISBN 0-13-726175-6.
- [5] Falorca I.M.C.F.G. e Pinto M.I.M. (2002), "Sand reinforced with short length synthetic fibres randomly oriented", 7<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Nice, França, ISBN 90-5809-523-1, Vol. 4, pp. 1237-1240.
- [6] Pinto, M.I.M. e Falorca, I.M.C.F.G. (2005), "Improvement of sand by short length polypropylene fibres randomly oriented", 6<sup>th</sup> International Conference on Ground Improvement Techniques, Coimbra, Portugal, ISBN 981-05-3545-7, pp. 509-516.
- [7] Pinto, M.I.M. e Falorca, I.M.C.F.G. (2005), "Comportamento do solo microreforçado com fibras curtas", I Seminário Português sobre Geossintéticos, Porto, Portugal, pp. 135-144.
- [8] ASTM D2487 de 1985: Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- [9] NP EN ISO 5079 de 1997: Têxteis – Fibras, determinação da força de rotura e alongamento de rotura de fibras individuais.
- [10] Pinto, M. I. M. (1987), "Alguns factores que influenciam a resistência residual de solos." Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 137 p.
- [11] McGown, A., Andrawes, K. Z., Hytiris, N. and Mercer, F. B. (1985), "Soil strengthening using randomly distributed mesh elements", Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, USA, Balkema, Rotterdam, Vol. 3, pp. 1735-1738.
- [12] Morel, J. C. and Gourc, J. P. (1997), "Mechanical behaviour of sand reinforced with mesh elements", Geosynthetics International, Vol. 4, No. 5, pp. 481-508.
- [13] Gray, D. H. e Ohashi, H., 1983, "Mechanics of fibre reinforcement in sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 335-353.
- [14] Nataraj, M. S. and McManis, K. L. (1997), "Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibres", Geosynthetics International, Vol. 4, No. 1, pp. 65-79.
- [15] Gray, D. H. and Al-Refeai, T. (1986), "Behaviour of fabric versus fibre-reinforced sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 8, pp. 804-820.
- [16] Ranjan, G., Vasan, R. M. and Charan, H. D. (1996), "Probabilistic analysis of randomly distributed fibre-reinforced soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 6, pp. 419-426.
- [17] Benson C. H. and Khire M. V. (1994), "Reinforcing sand with strips of reclaimed high-density polyethylene", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 5, pp. 838-855.