

CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DE ARGILAS RIJAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CORTE TORSIONAL

LABORATORY STUDY OF STIFF CLAYS BY TORSIONAL SHEAR TESTS

Vieira, Ana, *LNEC, Portugal*, avieira@lneec.pt
Bilé Serra, João, *LNEC, Portugal*, biles@lneec.pt

RESUMO

O aparelho de corte torsional permite a aplicação na amostra cilíndrica oca de quatro cargas independentes. A sua combinação possibilita o controlo de quatro componentes de tensão: as tensões normais e a tensão de corte torsional. Sendo particularmente indicado para estudos de anisotropia, a aplicação de carregamentos de torção, compressão/extensão e de confinamento torna-o um equipamento com enormes potencialidades para a investigação do comportamento dos terrenos sob uma grande variedade de trajectórias de tensão. Neste trabalho são apresentados resultados de ensaios de corte torsional em amostras de terrenos sobreconsolidados do Oligocénico de Lisboa. É descrita a sequência de procedimentos para a preparação e montagem das amostras cilíndricas ocas, desenvolvida especificamente para o efeito. Apresentam-se resultados de dois ensaios de fluência não drenados de provetes consolidados isotropicamente.

ABSTRACT

Torsional shear tests enable the application of four independent loads to the hollow cylinder specimen. Their combination enables the control of four components of stress, namely the normal stresses and the torsional shear stress. Particularly indicated to study anisotropy, the independent control over the inner and outer cell pressures, the applied torque and axial load turns it to be an apparatus with great potential to study soil behaviour under different stress paths. In this work results of torsional shear tests made on natural stiff clays of Oligocene period are shown. All the testing procedures and the sequence of the hollow samples' preparation and set up are described. The presented results concern two sheared undrained tests isotropically consolidated with creep stages.

1. INTRODUÇÃO

Nos ensaios edométrico, triaxial e triaxial verdadeiro quer as tensões principais aplicadas a uma determinada amostra, quer as direcções de deformação induzidas, são paralelas às suas fronteiras, sendo apenas possível mudar as magnitudes relativas das tensões e deformações principais: as suas direcções são fixas. No ensaio triaxial, o ângulo α , que mede a inclinação da tensão principal máxima com a vertical, pode apenas tomar os valores de 0° ou 90° e o parâmetro $b = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$, que quantifica a importância da tensão principal intermédia, de 0 em compressão ou 1 em extensão. Pelo contrário, os aparelhos de corte directo, de corte simples e de corte anelar permitem a rotação das direcções principais de tensão e de deformação, mas como nem todas as componentes da deformação podem ser medidas, não é possível obter a magnitude das tensões principais ou controlar/conhecer as suas direcções. Os ensaios convencionais de corte simples e directo permitem alterar b e rodar o eixo de σ_1 , mas são requeridas medidas especiais para monitorizar o estado de tensão e medir adequadamente a

resposta em deformação (Potts e Zdraković, 2001). O aparelho de corte torsional não apresenta as limitações acima referidas, uma vez que permite um controlo total, tanto da magnitude como da rotação das tensões principais, pela aplicação na amostra cilíndrica oca (Figura 1) de quatro cargas independentes. Estas cargas são: a pressão interior na câmara, p_i , a pressão exterior na câmara, p_e , a carga vertical, F_z , e o momento torsor, T . A sua combinação permite o controlo das quatro componentes de tensão, designadamente das tensões normais σ_z , σ_r e σ_θ e da tensão de corte torsional $\tau_{z\theta}$. Porque as três tensões principais podem ser controladas, é também possível controlar independentemente o parâmetro b . Sendo particularmente indicado para estudos de anisotropia, a aplicação independente de carregamentos de torção, compressão/extensão e de confinamento, torna-o num equipamento com enormes potencialidades para a investigação do comportamento reológico do terreno sob uma grande variedade de trajectórias de tensão.

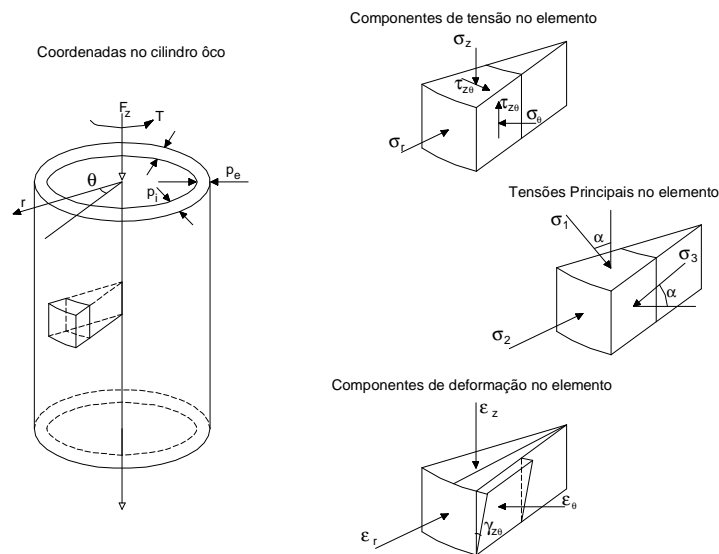


Figura 1 - Cargas actuantes e componentes de tensão e de deformação na amostra de cilindro oco

Uma grande parte dos estudos encontrados na bibliografia, refere-se a ensaios torsionais em amostras de areia preparadas em laboratório por métodos de pluviação. Em argilas naturais são encontradas menos referências, certamente como resultado das dificuldades associadas às fases de montagem e preparação de amostras ocas. Sem se pretender ser exaustivo, referem-se alguns trabalhos de corte torsional estáticos e dinâmicos em vários tipos de terreno: Lade (1976), Hight *et al.* (1983), Tatsuoka *et al.* (1986), Porović e Jardine (1994), Porović (1995), Frydman *et al.* (1995), Hight *et al.* (1997), Bilé Serra (1998), Santos (1999), Zdravkovic e Jardine (1997 e 2000) e Lade e Kirkgard (2000).

Neste trabalho são apresentados resultados de ensaios de corte torsional efectuados em argilas rijas do Oligocénico de Lisboa. Os ensaios fizeram parte das actividades de caracterização desta formação, com vista ao estudo do seu comportamento dependente do tempo (Vieira, 2006). O objectivo inicial era o da realização de uma série de ensaios ao longo de diferentes direcções no espaço das tensões principais, com vista a definir a forma da sua superfície de cedência no plano deviatórico para efeitos de modelação. O número de ensaios realizados não permitiu alcançar o objectivo proposto. No entanto, foram realizados ensaios para ângulos de Lode, θ , de 0 e 15°.

Partindo do pressuposto que o terreno é isotrópico, verifica-se que em termos de ensaio é vantajoso proceder inicialmente a uma rotação da tensão principal máxima, o que permite tirar partido da torção, e mais facilmente impor o corte à amostra. Por este motivo, foi seleccionado para o segundo ensaio um valor de $\alpha=10^\circ$. Em seguida procedeu-se ao corte das amostras.

2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento de corte torsional é um protótipo concebido no LNEC (Bilé Serra, 1998) e projectado e construído pela firma *GDS Instruments*. É constituído por cinco unidades fundamentais: a câmara triaxial; o sistema de controlo e aquisição de dados; o sistema de controlo axial; o sistema de controlo de torção e o sistema de controlo de pressões e volumes. A câmara triaxial é composta por um invólucro cilíndrico de perspex, ligado nos extremos a dois anéis de aço de rigidez elevada por sua vez ligados entre si por montantes rígidos, e por uma tina inferior rígida em alumínio. Dispõe de doze ligações ao exterior destinadas ao estabelecimento de ligações hidráulicas ou eléctricas.

As grandezas que é possível controlar directamente com o equipamento são: a força axial, F_z , o deslocamento vertical, ΔH , o momento torsor, T , a rotação de torção, θ , a pressão na zona interior da câmara, p_i , a variação de volume no interior da câmara, ΔV_i , a pressão na zona exterior da câmara p_e , a variação de volume no exterior da câmara, ΔV_e , a contrapressão, cp , e a variação do fluído intersticial, ΔV .

A acção axial efectua-se alternativamente nos modos de deslocamento controlado, de tensão controlada, ou ainda, de força controlada. Quanto à acção de torção, esta é realizada, alternativamente, com controlo de rotação de torção, de momento torsor ou de tensão nominal de corte em planos horizontais. No primeiro caso, é imposta à base do pedestal porta-provetes uma rotação preestabelecida. No segundo modo de rotação de torção, efectua-se o servocontrolo da rotação relativamente à leitura do momento torsor na célula mista referida. Finalmente, no terceiro modo, a rotação é servo-controlada relativamente à tensão nominal de corte em planos horizontais em função dos raios correntes do provete.

A medição de grandezas experimentais ao longo do ensaio é efectuada com recurso a placas de aquisição rápida de dados, com condicionador de sinais e um extenso conjunto de transdutores. Algumas das medições efectuam-se por meio de transdutores directamente implantados nos controladores (transdutores internos). Estão, neste caso, a medição da posição axial e da rotação do veio dos actuadores digitais e a medição da pressão em cada um dos controladores. As restantes medições efectuam-se em transdutores externos colocados na proximidade do provete ou directamente sobre a sua fronteira. Encontram-se nesta circunstância as medições:

- da força axial, através da célula mista axial/torsional;
- do momento torsor através da célula mista axial/torsional;
- do deslocamento axial através de um LVDT colocado no exterior da câmara junto ao veio;
- da rotação de torção através de um LVDT colocado no exterior da câmara junto ao veio;
- da pressão intersticial através de um transdutor de pressão;
- da pressão na câmara através de um transdutor de pressão;
- da diferença entre p_i e p_e através de um transdutor de pressão diferencial líquido-líquido;
- da diferença entre p_e e a pressão intersticial através de um transdutor de pressão diferencial líquido-líquido.

3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras ensaiadas pertencem à designada *Formação de Benfica*. Esta unidade geológica, característica da região de Lisboa, surge intercalada entre o Manto Basáltico de Lisboa e os primeiros níveis marinhos do Miocénico Inferior, sendo atribuída ao Paleogénico. É caracterizada por elevadas heterogeneidades vertical e lateral e graus de sobreconsolidação relativamente elevados (Vieira *et al.*, 2008).

O processo de preparação de amostras cilíndricas ocas numa amostra de solo natural reveste-se de grandes dificuldades. No caso dos terrenos da *Formação de Benfica* as tarefas de executar, manter a integridade e minimizar a perturbação de uma amostra de cilindro oco de 2 cm de espessura (raio externo, r_e , de 35 mm e raio interno, r_i , de 15 mm), revelaram-se especialmente difíceis. Problemas como a fissuração, descompressão e desagregação das amostras, foram recorrentes.

Para a execução das amostras, contou-se com o apoio de um técnico especializado, que utilizou um torno mecânico e um conjunto de ferramentas fabricadas para este efeito. Nas Figuras 2 e 3 mostra-se a sequência de operações adoptada para a sua realização, a extracção da amostra e sua posterior colocação no pedestal porta-provetes. Esta sequência foi estabelecida após uma série de insucessos, alguns dos quais, pelos motivos apontados.

- corte da amostra no tubo porta-amostra de pvc e sua colocação no torno mecânico de eixo de rotação horizontal;
- realização de cortes no tubo de pvc e cravação de um amostrador de aço de parede delgada biselado com o diâmetro final da amostra;
- colocação do amostrador no torno mecânico e furação do interior da amostra com o auxílio de brocas com diâmetros sucessivamente crescentes até obtenção do diâmetro interior definitivo, (ligeiramente superior ao diâmetro do pedestal porta-provetes);
- suporte provisório do interior do furo com um tubo plástico e extracção por pressão do amostrador de aço, com recurso a ferramentas especialmente concebidas para o efeito, e novamente com o apoio do torno;
- colocação da amostra no pedestal porta-provetes e por último no sistema de corte torsional.



Figura 2 - Cravação do amostrador metálico com o diâmetro correspondente ao diâmetro exterior final e realização do furo interior

4. TIPOS DE ENSAIOS

No primeiro ensaio realizado foi seguida a designada trajectória de corte proporcional controlada por deformação. Neste tipo de trajectória, as tensões normais actuantes no plano horizontal transversal à amostra, σ_r e σ_θ , mantêm-se constantes e iguais, respectivamente, a p_i

e p_e , sendo o corte imposto apenas por aplicação de um momento torsor. Como consequência do aumento da tensão de corte torsional $\tau_{z\theta}$, aumentam, simultaneamente, as tensões principais máxima e mínima. No decurso do corte, o ângulo de Lode e o parâmetro b variaram ligeiramente porque foi aplicada uma pequena força vertical F_z . Caso esta força fosse nula, ocorreria a situação em que b iguala 0,5 a que corresponderia um ângulo de Lode nulo. No segundo ensaio (controlado por tensão), o corte foi imposto tomando partido da independência entre as pressões externa e interna. À trajectória de corte, igualmente caracterizada por aumento da tensão distorcional, q , agora sob tensão média, p , constante, esteve associado um ângulo de Lode θ de 15° . O ensaio foi realizado para um ângulo entre a tensão vertical máxima e a vertical α de 10° .

A fórmula de Cardano permite determinar as tensões principais em função do ângulo de Lode, sendo possível relacionar directamente b com θ , de acordo com:

$$b = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{3} - 3 \operatorname{tg} \theta}{\sqrt{3} - \operatorname{tg} \theta} \right) \quad [1]$$

Ao ângulo de Lode referido ($\theta=15^\circ$) correspondeu, assim, a um valor de b de 0,317.

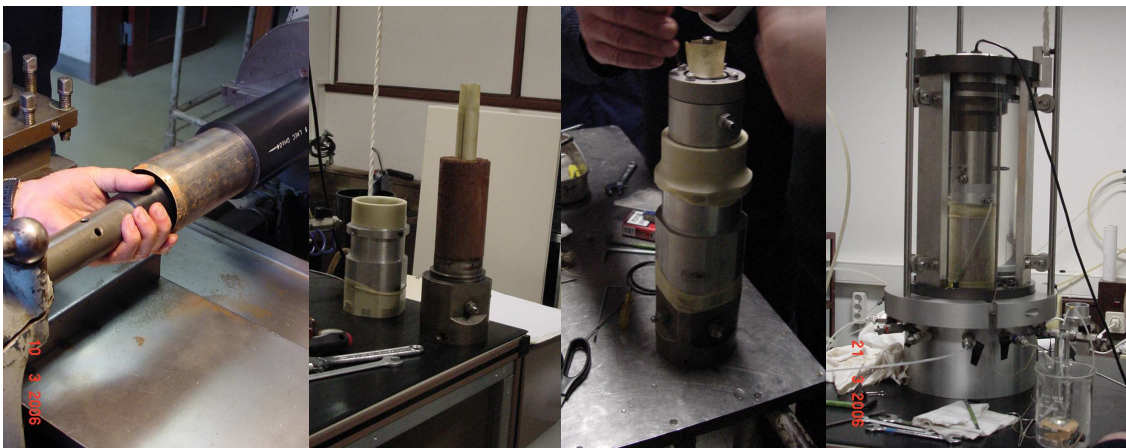


Figura 3 - Extração da amostra, sua colocação no pedestal porta-provetes e no sistema de corte torsional

No Quadro 1 apresentam-se resultados de ensaios de identificação referentes às duas amostras testadas e algumas informações referentes à fase de consolidação. As amostras foram consolidadas isotropicamente, sob uma tensão efectiva constante e igual a 200 kPa.

Quadro 1- Dados relativos ao terreno e aos ensaios de corte torsional

amostra	w (%)	w_l (%)	I_p (%)	G_s	γ_d (kN/m ³)	I_c	A_r	classificação	σ'_c (kPa)	e_i	c_p (kPa)
3865tsa	16,37	71,0	40,9	2,69	17,53	1,34	1,74	SC	199,7	0,535	500,2
3865tsb	10,77	48,6	26,8	2,70	18,30	1,41	2,18	SC	201,5	0,475	443,5

Nas trajectórias de corte impostas no ensaio de corte torsional, foram alternados níveis de acréscimo da tensão deviatória, mantendo a tensão média constante, a uma taxa relativamente rápida, com patamares de fluência a q constante, com duração mínima de 24 horas. No primeiro ensaio as grandezas experimentais p_i , p_e e F_z , mantiveram-se constantes no decurso de todo o ensaio. Estabeleceu-se a correspondência entre a velocidade de deformação axial imposta nas fases de corte nos ensaios triaxiais, de 0,005 mm/min (Vieira, 2006), a uma velocidade de rotação de 0,002 rad/min, para aplicação do momento torsor T . No segundo ensaio, uma vez que

foi um ensaio controlado por tensão, fez-se corresponder o tempo de duração de cada fase de carga, ao tempo que decorreu em média no ensaio precedente (7 minutos).

A interpretação dos ensaios de corte torsional, e a adopção de um estado de tensão e de um estado de deformação representativos do provete, impõe a assunção de alguns pressupostos, designadamente, o recurso à lei constitutiva do material ensaiado. Partiu-se do pressuposto que o terreno é isotrópico, ou seja, as propriedades materiais não variam com a direcção do carregamento imposto nem com a orientação da amostra. Para interpretação do estado de tensão no provete foram utilizadas as seguintes expressões:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{\pi(r_e^2 - r_i^2)} + \frac{p_e r_e^2 - p_i r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}; \sigma_r = \frac{p_e r_e + p_i r_i}{r_e + r_i}; \sigma_\theta = \frac{p_e r_e - p_i r_i}{r_e - r_i}; \tau_{z\theta} = \tau = \frac{3}{2\pi} \frac{T}{r_e^3 - r_i^3} \quad [2]$$

5. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Para o primeiro ensaio, é representada na Figura 4 a evolução das tensões principais e, na Figura 5 a evolução do ângulo de Lode θ e de b , em função da tensão de corte torsional $\tau_{z\theta}$. Para o segundo ensaio, apresentam-se as evoluções das tensões principais, das tensões σ_z , σ_r e σ_θ , das pressões interna e externa e de θ e b , igualmente em função de $\tau_{z\theta}$ (Figuras 6 a 9). Nas Figuras 10 e 11 ilustra-se a evolução da tensão de desvio q em função da rotação das amostras e a evolução destas últimas no decurso do tempo dos dois ensaios de fluência. Note-se que neste caso o invariante q é definido no espaço das tensões generalizado. As trajectórias de tensões p - q são representadas na Figura 12.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

No primeiro ensaio verificou-se uma súbita aceleração da rotação assim como uma quebra brusca do momento torsesor aplicado. O ensaio terminou numa fase precoce, quando o provete exibia ainda um comportamento contractante. Constatou-se posteriormente que a amostra se encontrava ainda praticamente intacta, confirmando-se que não estaria próxima de uma fase de rotura. Supõe-se que terá ocorrido um deslizamento da placa de topo em relação à amostra, por falta de adesão, questão que, por lapso, não foi devidamente equacionada antes do início do ensaio.

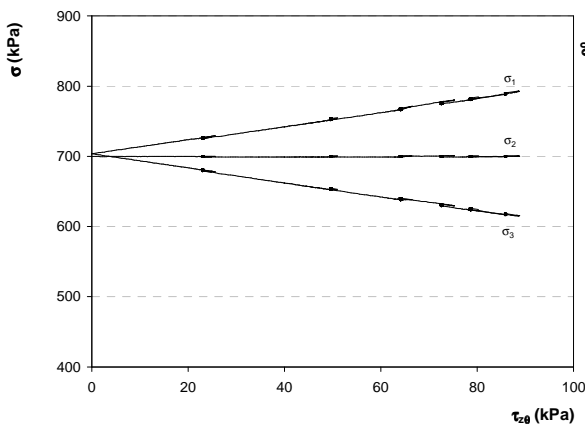


Figura 4 - Evolução das tensões principais em função da tensão de corte $\tau_{z\theta}$ (amostra 3865tsa)

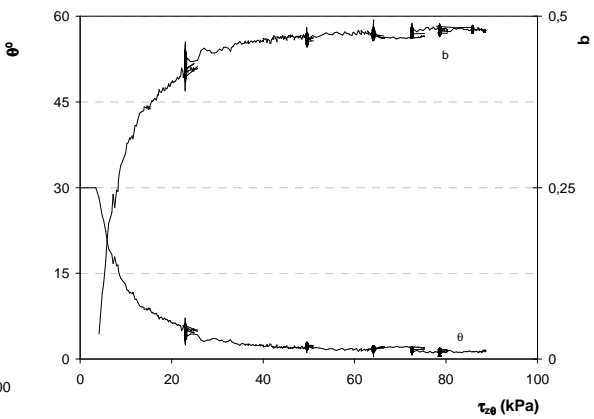


Figura 5 - Evolução de θ e b em função da tensão de corte $\tau_{z\theta}$ (amostra 3865tsa)

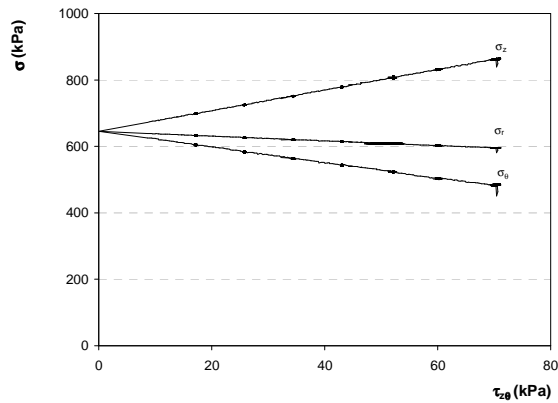


Figura 6 - Evolução das tensões principais em função da tensão de corte $\tau_{z\theta}$ (amostra 3865tsb)

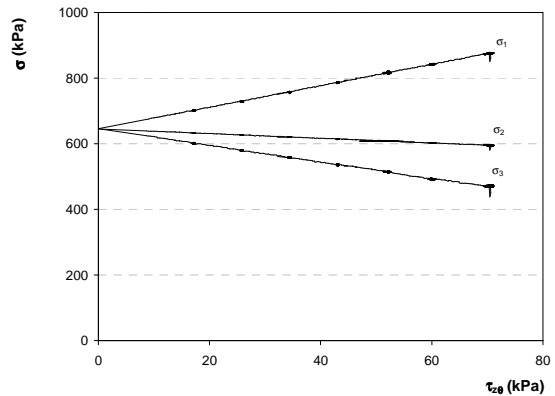


Figura 7 - Evolução das tensões σ_r , σ_θ e σ_z em função da tensão de corte $\tau_{z\theta}$ (amostra 3865tsb)

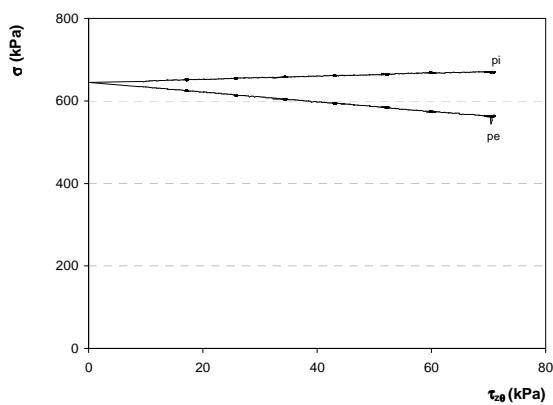


Figura 8 - Evolução das pressões interna e externa em função da tensão de corte $\tau_{z\theta}$ (amostra 3865tsb)

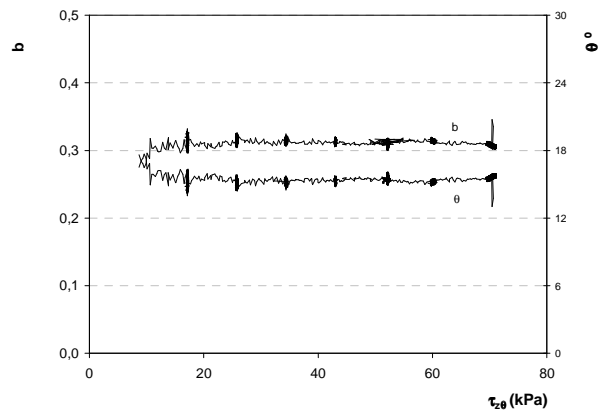


Figura 9 - Evolução de θ e b em função da tensão de corte $\tau_{z\theta}$ (amostras 3865tsa e 3865tsb)

Tomando como referência os valores de $\tau_{z\theta}$ obtidos no primeiro ensaio, no segundo ensaio o corte foi imposto tomando partido da diferença das pressões interna e externa e da inclinação da tensão máxima com a vertical. A força vertical crescente aplicada permitiu que se tivessem alcançado níveis de q substancialmente superiores, sem que tivesse sido vencido o atrito entre a placa de topo e a amostra de solo. No segundo ensaio foi atingido um nível de tensão distorcional mais elevado, assim como um comportamento dilatante, no entanto, a taxa de deformação era ainda negativa, pelo que não foi alcançada a rotura por fluência.

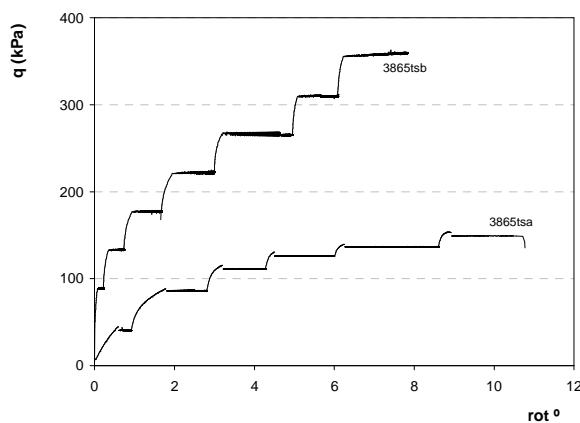


Figura 10 - Relações q - rot° no decurso dos ensaios torsionais de fluência (amostras 865tsa e 3865tsb)

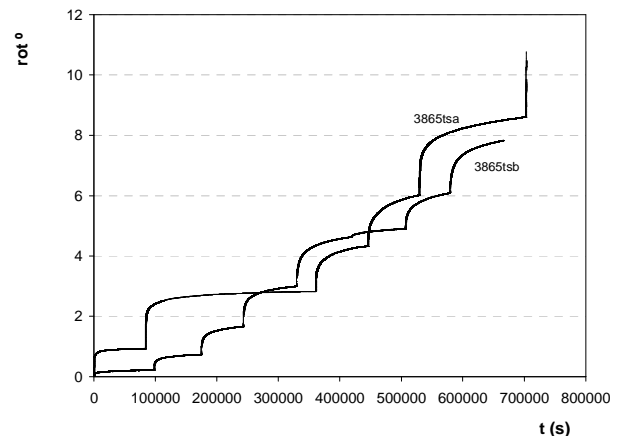


Figura 11 - Relações rot° - t no decurso dos ensaios torsionais de fluência (amostras 3865tsa e 3865tsb)

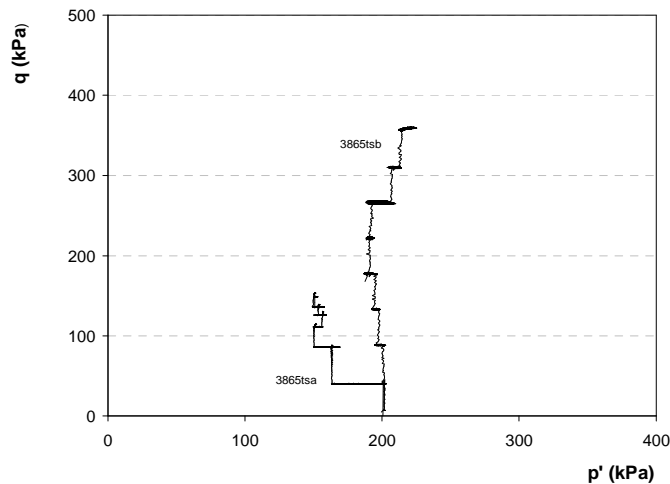


Figura 12 - Trajectórias de tensão no espaço p' - q nos ensaios de corte torsional (amostras 3865tsa e 3865tsb)

O servo-controlo do sistema de actuação foi muito eficaz, tendo apenas ocorrido pequenas oscilações na tensão distorcional nos patamares de fluência. Por outro lado, a comparação com as trajectórias de tensão obtidas em ensaios de corte triaxial (Vieira, 2006) indicaram a pequena perturbação induzida pelo processo de realização das amostras ocas. Qualitativamente, o comportamento foi semelhante ao verificado naqueles ensaios, onde as amostras exibiram um comportamento inicialmente contractante, verificando-se em seguida uma tendência para aumento de volume. Nos patamares de fluência, a rotação da amostra ao longo do tempo aumentou com o nível de tensão aplicada. Os níveis de rotação alcançados no segundo ensaio foram inferiores, uma vez que o carregamento imposto induziu, também, importantes deformações nas outras componentes do tensor das deformações.

O módulo de distorção no plano da parede da amostra cilíndrica $G_{z\theta}$ pode ser obtido relacionando a tensão de corte $\tau_{z\theta}$ com a distorção por:

$$\gamma_{z\theta} = \frac{2\theta}{3H} \frac{r_e^3 - r_i^3}{r_e^2 - r_i^2} \quad [3]$$

Na Figura 13 mostra-se a evolução do módulo de rigidez com a distorção no decurso dos ensaios de corte torsional. Os resultados referentes às menores deformações, obtidos no segundo ensaio 3865tsb, puderam ser comparados com os obtidos em ensaios *cross-hole* na zona onde foram recolhidas as amostras. Nestes ensaios de campo foram registados valores de velocidade das ondas de corte, entre os 15 e os 19 m de profundidade, de $V_s=600$ a 775 m/s. A comparação dos valores obtidos pelas duas vias poderá, eventualmente, indicar que a perturbação induzida pelo processo de preparação das amostras não terá sido suficiente para alterar significativamente a rigidez para muito pequenas deformações. Na figura referida observa-se uma elevada quebra de rigidez para as deformações mais reduzidas. No entanto, as amostras têm uma importante fracção arenosa e apresentam já um certo grau de litificação, o que, eventualmente, poderá justificar essa degradação na rigidez na gama das pequenas deformações. De notar, também, que as taxas de deformação impostas no carregamento são reduzidas. Trabalhos recentes evidenciam o efeito da taxa de deformação na degradação da rigidez. As curvas apresentadas por (Tsai e Hashash, 2009) mostram, em alguns casos, quebras de rigidez da ordem das apresentadas. Refira-se, no entanto, que o número de pontos e o número de ensaios não permite concluir de forma definitiva sobre este efeito.

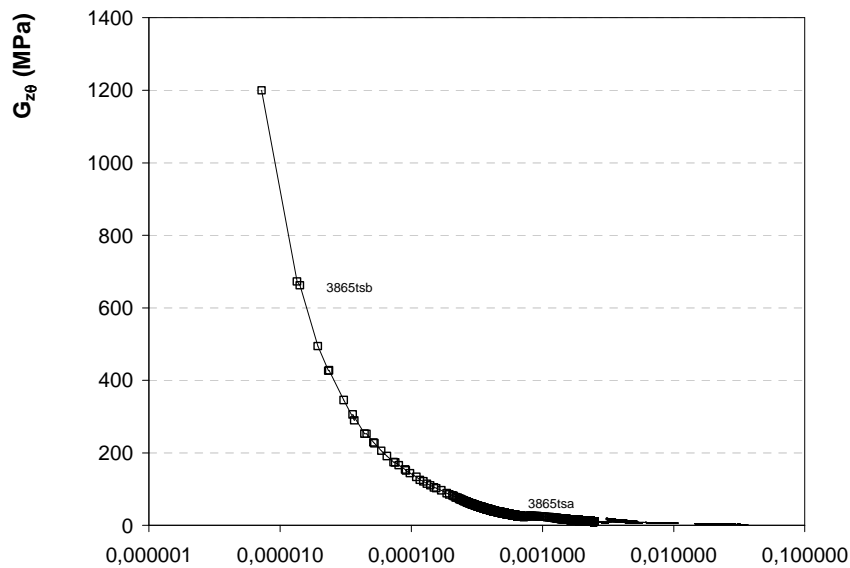


Figura 13 - Evolução do módulo de distorção $G_{z\theta}$ em função da distorção $\gamma_{z\theta}$ nos ensaios de corte torsional

7. NOTAS FINAIS

Tendo em vista o estudo do comportamento no tempo das argilas rijas da *Formação de Benfica*, foram realizados ensaios com recurso ao aparelho de corte torsional do LNEC, para estados generalizados de tensão no espaço octaédrico. Para tal, foram executadas amostras cilíndricas ocas com 2 cm de espessura. A possibilidade de variação do ângulo entre a tensão principal máxima e a vertical e da tensão intermédia foram possibilitadas por este sistema de ensaio. Foi investigado o comportamento sob trajectórias de tensão no espaço octaédrico, caracterizadas por ângulos de Lode de 0° e 15° , a que correspondem valores de b de 0,5 e 0,317, respectivamente. As amostras foram submetidas ao corte não drenado com a realização de patamares de fluência para q constante. A sobreposição das trajectórias de tensão obtidas no sistema de corte torsional, com as obtidas previamente em ensaios de corte triaxial, indicou a pequena perturbação induzida pelo processo de realização das amostras. A realização com sucesso destes ensaios em amostras de argila no seu estado natural vem proporcionar uma mais valia muito significativa no estudo do comportamento e na modelação constitutiva deste tipo de materiais.

REFERÊNCIAS

- Bilé Serra, J.P. (1998). *Caracterização Experimental e Modelação Numérica do Comportamento Cíclico de Solos Não Coesivos*. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Frydman, S.; Talesnick, M.; Puzrin, A. (1995). *Colinearity of stresses, strains and strain increments during shearing of soft clay*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 121, nº 2, pp. 174-184.
- Hight, D.W.; Gens, A.; Symes, M.J. (1983). *The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotations in soils*. Géotechnique, vol. 33, nº 4, pp. 355-383.
- Hight, D.W.; Bennel, J.D.; Chana, B.; Davis, P.D.; Jardine, R.J.; Porović, E. (1997). *Wave*

- velocity and stiffness of the Crag and Lower London Tertiaries at Sizewell. Géotechnique, vol. 47, n° 3, pp. 451-474.*
- Lade, P.V. (1976). *Interpretation of torsion shear tests on sand*. Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, Virginia, vol. 1, pp. 381-389.
- Lade, P.V.; Kirkgard, M.M. (2000). *Effects of stress rotation and changes of b-values on cross-anisotropic behaviour of natural, K_0 -consolidated soft clay*. Soils and Foundations vol. 40, n° 6, pp. 93-105.
- Porović, E.; Jardine, R.J. (1994). *Some observations on the static and dynamic shear stiffness of Ham River Sand*. Proceedings of the 1st International Conference on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Sapporo, Japan, vol. 1, pp. 25-30.
- Porović, E. (1995). *Investigation of Soil Behaviour Using a Resonant-Column Torsional-Shear Hollow Cylinder Apparatus*. Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London, London.
- Potts, D.M.; Zdraković, L. (2001). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering. Applications*. Thomas Telford, London.
- Santos, J. (1999). *Caracterização de Solos através de Ensaíos Dinâmicos e Cíclicos de Torção*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S., Okamoto, M. (1986): *Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods*. Soils and Foundations, 26(3), pp. 23-41.
- Tsai, C.; Hashash, Y. (2009). *Learning of dynamic soil behaviour from down-hole arrays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 135, n° 6, pp. 745-757.
- Vieira, A.M. (2006). *Estudo do Comportamento Diferido no Tempo de Túneis em Argilas Sobreconsolidadas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Vieira, A.; Bilé Serra, J.; Jeremias, F.T. (2008). *Caracterização geotécnica da Formação de Benfica*. Actas do XI Congresso Nacional de Geotecnia e IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, pp. 275-282.
- Zdrakovic, L.; Jardine, R.J. (1997). *Some anisotropic stiffness characteristics of a silt under general stress condition*. Géotechnique, vol. 47, n° 3, pp. 407-437.
- Zdrakovic, L.; R.J. Jardine, R.J. (2000). *Undrained anisotropy of K_0 -consolidated silt*. Canadian Geotechnical Journal vol. 37, pp. 178-200.