

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO HOLLOW CYLINDER PARA O ESTUDO DE DEFORMAÇÕES PERMANENTES EM SOLOS

Juliana de Azevedo Bernardes

Adriano Virgílio Damiani Bica

Washington Peres Núñez

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RESUMO

O efeito da rotação do plano de tensões principais em campo, proveniente de esforços provocados por obras de engenharia, é objeto de estudo e pesquisa no mundo todo. Vários equipamentos tentam simular em laboratório este comportamento, mas o único que fornece controle sobre a magnitude e a direção das tensões principais é o equipamento *hollow cylinder*. Um equipamento *hollow cylinder* está sendo desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Sua principal aplicação será na simulação das tensões e deformações que ocorrem em camadas de solo, submetidas aos esforços ocasionados pelo tráfego de veículos. O equipamento se encontra em fase final de montagem. Um solo residual de arenito Botucatu está sendo utilizado nesta pesquisa. Ensaio para caracterização e determinação de parâmetros relevantes à pavimentação já foram realizados. Ensaio no equipamento *hollow cylinder* serão realizados para simular sua resistência a deformações permanentes.

ABSTRACT

The effect of principal stress rotation, caused by field engineering works, has been studied all around the world. Many laboratory apparatus try to simulate this behaviour, but the only one that is able to control the magnitude and direction of principal stresses is the hollow cylinder. A hollow cylinder apparatus has been developed at Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). It will be applied on simulation of stress-strain behaviour of soil layers submitted to wheel loads. The assembly of this apparatus has been concluding. A residual soil of Botucatu sandstone have been used in this research, characterizations tests and the others that are important to paving field were made. Hollow cylinder tests will be made to simulate the permanent strain behaviour.

1. INTRODUÇÃO

Somente por meio da simulação da rotação das tensões principais é possível reproduzir em laboratório, o comportamento geotécnico dos solos em diversos tipos de solicitações, como por exemplo, em camadas de pavimentos submetidos ao carregamento imposto pelo tráfego de veículos. Neste tipo de solicitação, a rotação de tensões principais influencia diretamente no acúmulo de deformações plásticas, que são muito importantes na avaliação do comportamento global de um pavimento. A Figura 1 ilustra a distribuição das tensões que ocorrem em um elemento do pavimento durante a passagem de veículos.

O *hollow cylinder* é um equipamento de laboratório que combina carregamento axial, torque e pressões interna e externa, em um corpo de prova tubular. A magnitude e a direção das tensões principais maior e menor podem ser controladas, juntamente com a magnitude da tensão principal intermediária. A Figura 2a mostra as forças e pressões aplicadas neste ensaio, a Figura 2b mostra as tensões que se desenvolvem em um elemento do corpo de prova e a Figura 2c apresenta estas tensões em termos de tensões principais.

Está sendo desenvolvido um equipamento *hollow cylinder* na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como objetivo principal desta tese. Inicialmente, o equipamento será destinado à simulação das solicitações que ocorrem nos solos que compõe camadas de pavimento, em especial ao comportamento relacionado às deformações permanentes que ocorrem como consequência destas solicitações.

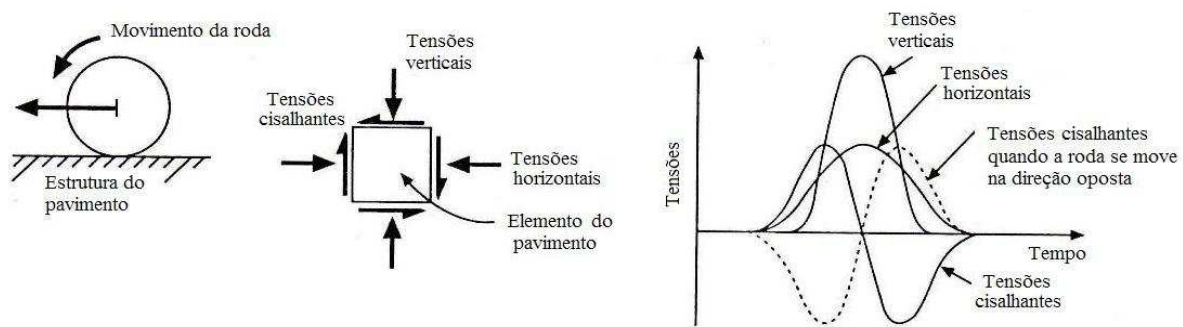


Figura 1: Variações de tensões em um elemento de pavimento em função do tempo, provocadas pela passagem dos veículos.

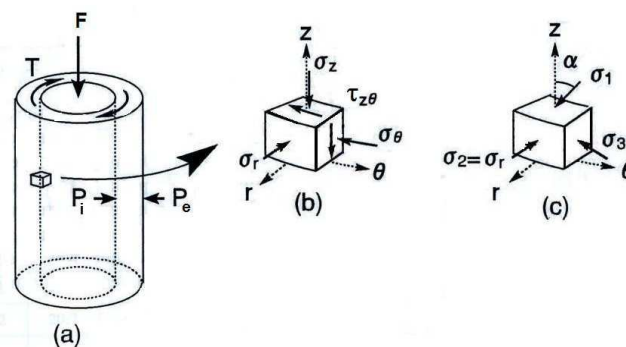


Figura 2: Distribuição das tensões em um corpo de prova *hollow cylinder*: (a) força axial (F), torque (T) e pressões interna e externa (P_i e P_e); (b) tensões normal axial (σ_z), radial (σ_r) e circunferencial (σ_θ) e tensão cisalhante no plano z - θ ($\tau_{z\theta}$); (c) tensões principais maior (σ_1), menor (σ_3) e intermediária (σ_2), ângulo da tensão principal maior com o eixo vertical (α).

2. EQUIPAMENTOS *HOLLOW CYLINDER* NO MUNDO

Em pesquisa sobre equipamentos do tipo *hollow cylinder* foi possível constatar que, no mundo todo sua utilização está sendo cada vez mais consolidada na simulação de diferentes tipos de solicitações que envolvem a rotação das tensões principais em campo. Os estudos da liquefação e da anisotropia de resistência lideram a bibliografia sobre o assunto. As duas universidades que se destacam são o *Imperial College* na Inglaterra (Hight *et al.*, 1983; Minh, 2006) e a *University of Tokyo* no Japão (Pradel *et al.*, 1990; Ampadu e Tatsuoka, 1993), que há pelo menos três décadas vêm aprimorando as técnicas e métodos de ensaios, além de investirem na construção e aquisição de novos equipamentos. A utilização de equipamentos *hollow cylinder* direcionada especificamente a área de pavimentação, foi identificada no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* na França (Nasreddine, 2004) e na *University of Nottingham* (Richardson, 1999).

O efeito da rotação das tensões principais nas deformações permanentes de camadas granulares que compõe os pavimentos, ainda não é completamente compreendido. Um dos principais motivos é que o ensaio mais utilizado para simular as condições do tráfego em laboratório, o ensaio triaxial de carregamento repetido, não consegue promover uma mudança contínua na direção da tensão principal (Lekarp *et al.*, 2000). A bibliografia disponível mostra que há um forte acréscimo na deformação permanente quando ocorre a rotação das tensões principais durante o ensaio. Este comportamento pode ser verificado nos trabalhos de Youd

(1972) através de ensaios em um equipamento *simple shear*, e Chan e Brown (1994) com ensaios em um *hollow cylinder*.

3. EQUIPAMENTO *HOLLOW CYLINDER* DA UFRGS

O equipamento *hollow cylinder* que está sendo desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul encontra-se na fase final de montagem. Toda sua estrutura metálica foi projetada dentro desta pesquisa, com base nos equipamentos apresentados na bibliografia internacional, em especial o equipamento *Mark II* desenvolvido no *Imperial College* (Jardine *et al.*, 2004). A aplicação de carga cíclica (axial e torsional) será feita através de cilindros pneumáticos do tipo *Bellofram*, com duração de 0,1 segundo. O sistema de aplicação de torque é composto por dois cilindros pneumáticos dispostos em sentidos opostos, ligados por uma correia que transfere rotação ao eixo central do corpo de prova, nos sentidos horário e anti-horário. As tensões serão medidas por células de carga do tipo *single point* e as deformações axiais e radiais por transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*linear variable differential transformer*). O sistema de aquisição de dados que será utilizado é o *Spider 8*, capaz de medir e controlar os esforços aplicados ao corpo de prova. O equipamento conta com diferentes tipos de rolamento (linear, axial e radial) para evitar ao máximo a ocorrência de atrito entre as peças, impedindo assim o desgaste e principalmente erros na medição das tensões normais e cisalhantes. A não uniformidade de tensões e deformações que se desenvolvem nas extremidades do corpo de prova é um dos principais problemas deste ensaio. Para minimizar seus efeitos é desejável que a relação entre altura e diâmetro externo do corpo de prova seja ≥ 2 (Tatsuoka *et al.*, 1986; Rolo, 2003). Serão realizados ensaios em corpos de prova com 20 cm de altura, 10 cm de diâmetro externo e 6 cm de diâmetro interno. O pedestal e o cabeçote devem ser responsáveis por transferir o torque ao corpo de prova no equipamento *hollow cylinder*, diferente do equipamento triaxial onde não deve haver atrito entre estas peças e o solo. Foram usinadas finas palhetas de aço no pedestal e cabeçote, que cravam no corpo de prova assegurando que o torque seja transferido ao solo.

4. O SOLO RESIDUAL DE ARENITO BOTUCATU

O material utilizado nesta pesquisa é um solo residual de arenito Botucatu. Este solo apresenta feições da rocha matriz, porém com fraca cimentação. Análises microscópicas realizadas por Martins (2001) indicam que o material é composto por grãos de quartzo dispersos em uma matriz caulínica. A Tabela 1 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios de caracterização e compactação. Resultados dos ensaios triaxiais de carregamento repetido podem ser encontrados em Bernardes *et al.* (2006).

Tabela 1: Parâmetros de caracterização e compactação do solo residual de arenito Botucatu:

Parâmetro		Valor
Limite de liquidez		21 %
Limite de plasticidade		12 %
Peso específico real dos grãos		26,3 kN/m ³
Distribuição granulométrica	Areia média $0,2 < \phi \leq 0,6 \text{ mm}$	30%
	Areia fina $0,06 < \phi \leq 0,2 \text{ mm}$	30,8 %
	Silte $0,002 < \phi \leq 0,006 \text{ mm}$	32,7 %
	Argila $\phi \leq 0,002 \text{ mm}$	6,5 %
Compactação	Energia normal	Peso específico aparente seco máximo
		18,7 kN/m ³
	Energia intermediária	Umidade ótima
		12,8 %
		Peso específico aparente seco máximo
		19,3 kN/m ³
		Umidade ótima
		11,3%

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Serão realizados ensaios *hollow cylinder* em um solo residual de arenito Botucatu, com os mesmos valores de tensão desvio e pressão confinante utilizados em ensaios triaxiais de carregamento repetido para determinação da resistência a deformações permanentes. Como a principal finalidade da tese é a montagem do equipamento *hollow cylinder*, o programa experimental está condicionado a validar o funcionamento do equipamento, através da verificação do comportamento esperado. De acordo com a bibliografia consultada, deverá ocorrer um acréscimo de deformação permanente em relação aos ensaios realizados no equipamento triaxial, em função da aplicação de um estado de tensões mais condizente com o de campo. A previsão é que o equipamento entre em operação até o final do corrente ano.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) concedido a esta pesquisa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Ampadu, S. K., Tatsuoka, F. (1993) A hollow cylinder torsional simple shear apparatus capable of a wide range of shear strain measurement. *Geotechnical Testing Journal*, v. 16, n. 1, p. 3-17.
- Bernardes, J.A.; Malysz R.; Núñez, W.P.; Bica A.V.D., Ceratti, J.A.P. (2006) Comportamento mecânico de um solo residual de arenito Botucatu como subleito de pavimentos. *Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Brasília, v. 2, p.1268-1278.
- Chan, F.W.K., Brown, S.F. (1994) Significance of principal stress rotation in pavements. *Proceedings of 13th. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi. v. 4, p.1823-1826.
- Hight, D.W., Gens, A., Symes, M.J. (1983) The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils. *Géotechnique*, v. 33, n. 4, p. 355-383.
- Jardine, R.J. Gens, A., Hight, D.W., Coop, M.R. (2004) Developments in understanding soil behavior. *Proceedings of Conference on advances in geotechnical engineering: The Skempton Conference*. London,, v. 1, p. 103-206.
- Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A. (2000) State of the Art II – Permanent strain response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, v. 126, n.1, p. 76-83.
- Martins, F.B. (2001) *Investigação do comportamento mecânico de um solo naturalmente estruturado*. Tese de doutorado, PPGE/UFRGS, Porto Alegre.
- Minh, N.A. (2006) *An investigation of the anisotropic stress-strain-strength characteristics of an Eocene clay*. PhD. thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, United Kingdom.
- Nasreddine (2004) *Effet de la rotation des contraintes sur le comportement des sols argileux*. Docteur thèse, L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- Pradel, D., Ishihara, K., Gutierrez, M. (1990) Yielding and flow of sand under principal stress axes rotation. *Soils and Foundations*, v. 30, n. 1, p. 87-99.
- Richardson (1999) *The stress-strain behavior of dry granular material subjected to a repeated loading in a hollow cylinder apparatus*. PhD thesis, University of Nottingham, United Kingdom.
- Rolo, R. (2003) *The anisotropic stress-strain-strength behaviour of brittle sediments*. PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, United Kingdom.
- Tatsuoka, F., Sonada, S., Hara, K., Fukushima, F., Pradhan, T.B.S. (1986) Failure and deformation of sand in by torsional shear. *Soils and Foundations*, v. 26, n. 4, p. 79-97.
- Youd, T.L. (1972). Compaction of sands by repeated shear straining. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, v. 98, n. SM7, p.709-725.

Juliana de Azevedo Bernardes (julibernardes@yahoo.com.br)

Adriano Virgílio Damiani Bica (advbica@ppgec.ufrgs.br)

Washington Peres Núñez (wpnunez@ppgec.ufrgs.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar – Porto Alegre, RS, Brasil