

# XX Encontro de Iniciação à Pesquisa

Universidade de Fortaleza  
20 à 24 de Outubro de 2014

**Avaliação dos Resultados de Ensaios de Compressão Triaxial em Solos Granulares e Finos.** Yago Machado Pereira de Matos <sup>1</sup> \*(IC), Beatriz Rodrigues Soares <sup>2</sup> (IC), Fernando Feitosa Monteiro <sup>3</sup>(IC) , Ícaro Rodrigues Marques <sup>4</sup>(IC), Renan Oliveira Ribeiro <sup>5</sup>(IC), Marcos Fábio Porto de Aguiar <sup>6</sup>(PQ)

1. Universidade de Fortaleza – PIBIC/FUNCAP
2. Universidade de Fortaleza – PIBIC/CNPq
3. Universidade de Fortaleza – PAVIC
4. Universidade de Fortaleza – PAVIC
5. Universidade de Fortaleza – PAVIC
6. Universidade de Fortaleza – Curso de Engenharia Civil

yago\_mpm@hotmail.com; beatrizrodsoares@icloud.com; fernandofm91@hotmail.com;  
icarormarques@hotmail.com; renan\_ibeiro@hotmail.com; marcosfpa@hotmail.com

*Palavras-chave: Resistência ao Cisalhamento. Parâmetros de Resistência. Ensaio de Compressão Triaxial.*

## Resumo

O presente trabalho visa, por meio de ensaios de compressão triaxial, apresentar valores auferidos dos parâmetros de resistência de solos com constituições granulares e finas. Os resultados consideram a coesão real dos grãos, o ângulo de atrito interno do solo e o plano de ruptura das amostras. Em razão da natureza incerta dos solos nos diversos cenários do mundo, os ensaios de laboratório são muito importantes para estimativa de seus comportamentos e avaliação das tensões que neles atuam. No que diz respeito à determinação da resistência ao cisalhamento dos solos, existem dois tipos de ensaios de laboratório que são, habitualmente, executados: o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio de compressão triaxial. O ensaio triaxial, quando executado corretamente, fornece informações bastante consistentes sobre os parâmetros de resistência do solo. Os resultados obtidos de ângulo de atrito, coesão e plano de ruptura foram apresentados. Verificou-se a dificuldade de comparação entre os valores das duas amostras de solo.

## Introdução

### Tensões nos Solos

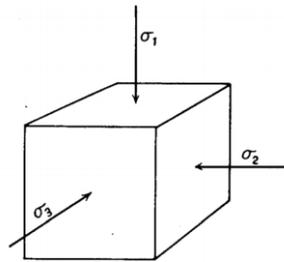
Para Lambe e Whitman (1969), o fato de o solo ser composto de vazios e partículas sólidas discretas, fornece-lhe certa liberdade de movimento entre seus grãos. Assim, esse simples fato distingue o solo dos materiais totalmente sólidos e fluidos, sendo possível, portanto, tratar do comportamento tensão-deformação desse material como mecânica de partículas. Segundo Pinto (2006), para a aplicação da mecânica dos sólidos deformáveis aos solos, deve-se partir do conceito de tensões. Uma maneira satisfatória consiste na consideração de que os solos são constituídos de partículas e que as forças aplicadas a eles são transmitidas de partícula a partícula, além das que são suportadas pela água dos vazios. Considera-se, inicialmente, a maneira como as forças se transmitem de partícula a partícula, que é muito complexa e depende do tipo de mineral. Entretanto, em qualquer caso, a transmissão se faz nos contatos e, portanto, em áreas muito reduzidas em relação à área total envolvida. Conforme Terzaghi (1936), a tensão normal total em um plano qualquer deve ser considerada como a soma de duas parcelas:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1)$$

Onde  $\sigma$  é tensão normal total,  $\sigma'$  é a tensão transmitida nos contatos entre as partículas, denominada tensão efetiva, e  $u$  é parcela da pressão total que se desenvolve na água ocorrente nos vazios do solo, também conhecida como pressão neutra ou poropressão.

### Resistência ao Cisalhamento dos Solos

Quando um corpo é submetido a uma carga externa, desenvolvem-se, nos diferentes pontos desse corpo, várias combinações de tensões normal,  $\sigma$ , e cisalhante,  $\tau$ . Dessa forma, as tensões atuantes nesses três planos, mutuamente, ortogonais e onde a tensão cisalhante é nula são denominadas tensões principais e designadas por  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  como indica a Figura 01.

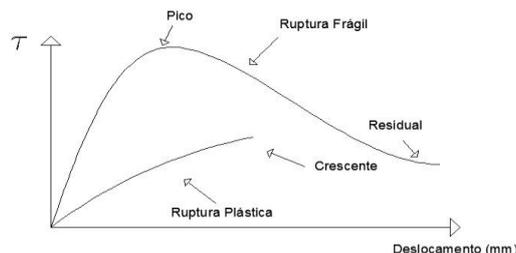


**Figura 01:** Plano de tensões principais (Bishop, 1962).

Onde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são definidas, respectivamente, como tensões principais maior, intermediária e menor. Contudo, pode-se fazer uso de hipóteses admitidas na mecânica dos solos a fim de simplificar os cálculos com base na teoria da elasticidade. Assim, em casos especiais, pode ocorrer o estado axissimétrico de tensões, no qual  $\sigma_2 = \sigma_3$ , o estado hidrostático de tensões, onde  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , e o estado plano de tensões, que considera  $\sigma_2 = 0$ . Conforme Pinto (2006), no estado plano de tensões, quando se conhecem os planos e as tensões principais em um determinado ponto, pode-se determinar as tensões em qualquer plano que passa por esse ponto. O cálculo é feito pelas equações de equilíbrio dos esforços aplicadas a um prisma triangular definido pelos dois planos principais e o plano considerado. A partir dessas equações, é possível obter expressões que indicam as tensões normal e cisalhante em função das tensões atuantes nos planos principais,  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , e do ângulo,  $\alpha$ , que o plano considerado determina com o plano principal maior.

Com a obtenção dessas expressões, pode-se representar as tensões  $\sigma_\alpha$  e  $\tau_\alpha$ , graficamente, por um círculo, em um sistema de coordenadas,  $(\sigma; \tau)$ , denominado Círculo de Mohr. Esse círculo é utilizado para simplificar a determinação de tensões e traduzir os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento dos solos. Conhecendo-se as tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , é possível determinar as coordenadas do centro e o raio desse círculo.

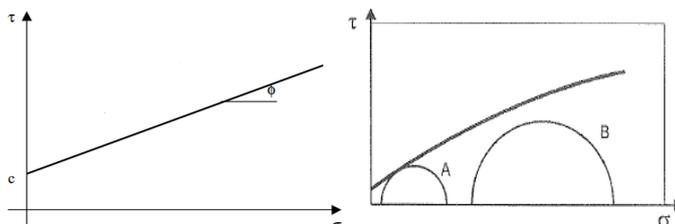
Em mecânica dos solos, a resistência ao cisalhamento pode ser definida como o máximo valor de tensão cisalhante que pode ocorrer na massa de solo. Desenvolvendo-se, caso esse valor seja excedido, a superfície de ruptura. A teoria da ruptura estabelece uma correlação entre tensão de ruptura, tensões aplicadas e algumas propriedades do solo. Conforme Marangon (2009), as curvas de ruptura (tensão x deformação) obtidas nos ensaios de resistência têm uma das formas mostrada na Figura 02.



**Figura 02:** Aspectos das curvas tensão x deformação (Marangon, 2009).

## Critérios de Ruptura

Pinto (2006) define esses critérios como formulações que buscam exprimir as condições em que ocorre a ruptura dos materiais. Existem critérios que estabelecem máximas tensões de compressão, de tração ou de cisalhamento. Outros se referem a máximas deformações. Um critério é satisfatório na medida em que reflete o comportamento do material em consideração. Contudo, a ruptura dos solos, quase sempre, é causa do fenômeno de cisalhamento. Dentre os principais critérios de ruptura, destaca-se o de Mohr-Coulomb. Por se tratar de uma combinação de dois critérios, a teoria de Mohr-Coulomb emprega a reta utilizada por Coulomb para traçar a envoltória tangenciando os círculos de Mohr conforme a Figura 03.



**Figura 03:** Representação dos critérios de ruptura de Coulomb e Mohr (Pinto, 2006).

Segundo Mohr (1890), a ruptura ocorre em um plano quando existe uma combinação crítica de tensão normal e cisalhante, e não um valor máximo de tensões: normal ou tangencial. A partir da elaboração da reta de Coulomb, tem-se:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (2)$$

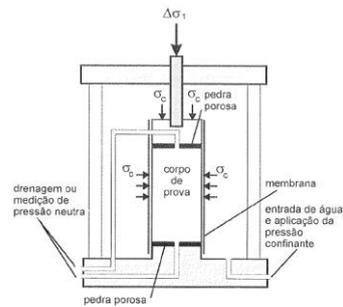
Onde  $\tau$  é a resistência ao cisalhamento do solo,  $\sigma$  é a tensão normal ao plano considerado,  $c$  é a coesão real do solo e  $\phi$  é o ângulo de atrito interno do solo. Desse modo, a coesão e o ângulo de atrito são denominados parâmetros de resistência dos solos. Apesar de esses critérios não levarem em consideração a tensão principal intermediária, conseguem refletir bem o comportamento do solo, pois a tensão principal intermediária tem pequena influência na sua resistência.

### Ensaio de Compressão Triaxial

Uma maneira bastante precisa de se obter os parâmetros de resistência de uma amostra de solo em laboratório é por meio do ensaio de compressão triaxial. O ensaio convencional consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico do solo (PINTO, 2006). Segundo Head (1994a), o ensaio de compressão triaxial oferece a condição mais satisfatória de medida da resistência ao cisalhamento dos solos. O princípio do ensaio de compressão triaxial é versátil, e os procedimentos podem ser relacionados a diversos problemas práticos. Possui a grande vantagem de controlar a magnitude das tensões principais, o controle da drenagem, e a medição da pressão neutra. Os resultados desses ensaios podem conceder um melhor entendimento do comportamento dos solos e de suas propriedades.

Antes de inserir o corpo de prova na câmara de ensaio, é necessário envolvê-lo com uma membrana de borracha. Em seguida, enche-se a câmara com água, que aplicará a pressão confinante ( $\sigma_3$ ) na amostra em todas as direções, para, finalmente, promover o carregamento axial ( $\sigma_1$ ). Durante o carregamento, medem-se o acréscimo de tensão axial e a deformação vertical do corpo de prova,  $\epsilon$ . Com os valores de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , é possível obter a tensão desviadora,  $\sigma_d$ , a qual é, conforme Head (1994b), tradicionalmente, associada com o rompimento de amostras de solo, pois sugere a máxima diferença entre as tensões principais. Uma ilustração do ensaio pode ser vista na Figura 04.

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3)$$



**Figura 04:** Esquema da câmara do ensaio triaxial (Pinto, 2006).

Quanto à aplicação do carregamento axial, o ensaio triaxial pode ser feito com carga controlada, quando executado com aplicação de forças no pistão, ou com deformação controlada, caso em que a câmara é deslocada para cima, pressionando o pistão. No que diz respeito à drenagem, o ensaio de compressão triaxial pode ser adensado drenado (CD), o qual ocorre drenagem permanente do corpo de prova; adensado não drenado (CU), que admite a expulsão da água, somente, durante a aplicação da tensão confinante; e não adensado não drenado (UU), cujo procedimento não permite qualquer drenagem.

### Metodologia

O trabalho foi realizado por meio de execução de ensaios de compressão triaxial em solos arenosos e argilosos, no qual foram utilizados, para cada amostra, diferentes maneiras de moldagem dos corpos de prova, a compactação estática e a talhagem respectivamente. Empregou-se em todas as amostras de solo o ensaio triaxial adensado não drenado (CU) e com deformação controlada. Aplicou-se para os solos granulares tensões confinantes de 1, 2 e 3 kgf/cm<sup>2</sup> e, para os solos finos, tensões confinantes de 0,5, 1 e 2 kgf/cm<sup>2</sup>. Os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para os dois tipos de solo foram apresentados, realizando-se, assim, as devidas considerações.

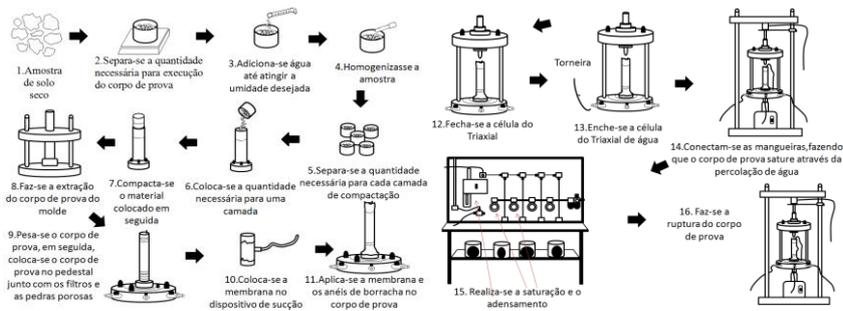
### Resultados e Discussão

Antes da execução dos ensaios triaxiais, foi necessária a caracterização das duas amostras de solo, conforme recomenda DNER (1994a, 1994c, 1994d e 1995). A Tabela 01 resume o resultado da granulometria das duas amostras.

**Tabela 01:** Resumo da granulometria das amostras.

Resumo Granulometria							
Tipo de Material	Pedregulho (> 4,8mm)	Areia Grossa (4,8 - 2,0mm)	Areia Média (2,0 - 0,42mm)	Areia Fina (0,42 - 0,075mm)	Silte (0,075 - 0,0075mm)	Argila (< 0,0075mm)	Total
Solo Granular	0%	0%	0%	83%	3%	14%	100%
Solo Fino	6%	2%	0%	30%	24%	38%	100%

Para a amostra granular, cuja moldagem foi feita por compactação estática, determinou-se a umidade ótima do material, seguindo DNER (1994b). Os corpos de prova foram, então, esculpidos com a quantidade de água determinada. Todos os procedimentos realizados nos ensaios de compressão triaxial estão detalhados na Figura 05.

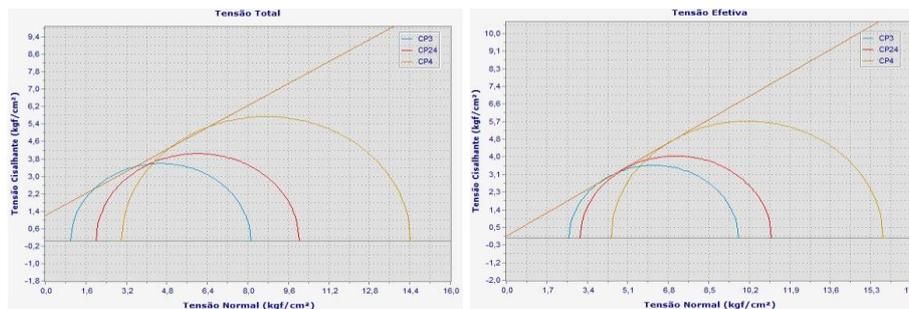


**Figura 05:** Resumo de procedimentos do ensaio de compressão triaxial (Monteiro, 2014).

O solo fino foi talhado a partir de uma amostra indeformada, seguindo, então, os mesmos procedimentos apresentados do material granular a partir da pesagem do corpo de prova. Os resultados dos ensaios para as amostras arenosas e argilosas são ilustrados nas Tabelas 02 e 03, e suas respectivas envoltórias nas Figuras 06 e 07.

**Tabela 02:** Resultados do ensaio para a amostra arenosa (Monteiro, 2014).

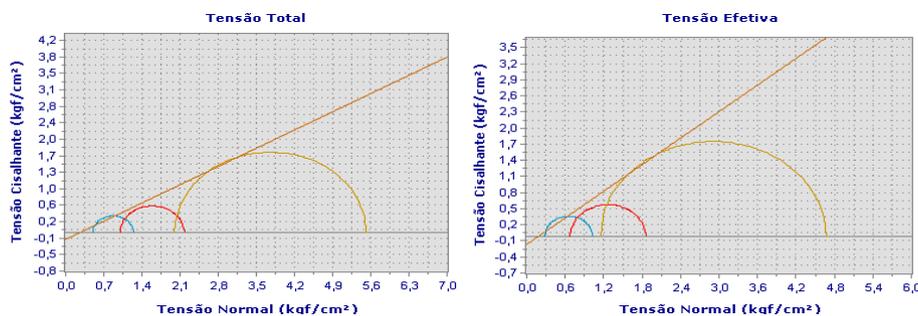
Corpo de Prova	$\sigma_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Raio (kgf/cm <sup>2</sup> )	$u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma'_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma'_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_d$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
3	1	8,12	3,56	-1,63	9,75	2,63	7,12
24	2	10,04	4,02	-1,1	11,14	3,1	8,04
4	3	14,43	5,72	-1,39	15,82	4,39	11,43



**Figura 06:** Envoltória com círculos de tensões totais e efetivas da amostra arenosa (Monteiro, 2014).

**Tabela 03:** Resultados do ensaio para a amostra argilosa.

Corpo de Prova	$\sigma_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Raio (kgf/cm <sup>2</sup> )	$u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma'_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma'_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_d$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	0,5	1,24	0,37	0,22	1,02	0,28	0,74
3	1	2,18	0,59	0,32	1,86	0,68	1,18
5	2	5,52	1,76	0,85	4,67	1,15	3,52



**Figura 07:** Envoltória com círculos de tensões totais e efetivas da amostra argilosa.

A Tabela 04 apresenta os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras arenosas e argilosas bem como seus planos de ruptura.

**Tabela 04:** Comparação dos parâmetros de resistência das amostras.

Amostra	$c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$c'$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	$\phi_T$ (°)
Argilosa	0,14	29,63	0,15	39,43	63
Arenosa	1,19	32,2	0,12	33,72	61

## Conclusão

Por meio deste trabalho, foi possível determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras de solo arenoso e argiloso fazendo uso do ensaio de compressão triaxial do tipo adensado não drenado e com deformação controlada. O solo deformado de composição granular foi moldado por compactação dinâmica e submetido a tensões confinantes de 1, 2 e 3 kgf/cm<sup>2</sup>, apresentando plano de ruptura de 61°, ângulos de atrito total e efetivo de 32,20° e 33,72°; e coesões total e efetiva de 1,19 kgf/cm<sup>2</sup> e 0,12 kgf/cm<sup>2</sup> respectivamente. Quanto à amostra indeformada de solo fino, que foi esculpida por talhagem e sujeita a níveis de tensão de 0,5, 1 e 2 kgf/cm<sup>2</sup>, exibiu plano de ruptura de 63°, ângulos de atrito total e efetivo de 29,63° e 39,43°; e coesões total e efetiva de 0,14 kgf/cm<sup>2</sup> e 0,15 kgf/cm<sup>2</sup> nessa ordem. Verificou-se a dificuldade de comparação entre os resultados das duas amostras em razão das diferentes condições de moldagem empregadas. Recomenda-se, assim, a realização de novos ensaios de compressão triaxial em amostra deformada argilosa a fim de justificar a comparação entre os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos dois tipos de solo.

## Referências

- BISHOP, A. W., HENKEL, D. J. **The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test**. 2 ed., London, UK: Edward, 1962.
- DNER-ME 051/94, **Análise Granulométrica**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro - RJ, 1994a.
- DNER-ME 084/95, **Determinação da Densidade Real do Grão**, Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro – RJ, 1995.
- DNER-ME 162/94, **Ensaio de Compactação**, Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro - RJ, 1994b.
- DNER-ME 122/94, **Determinação do Limite de Liquidez**, Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro – RJ, 1994c.
- DNER-ME 082/94, **Determinação do Limite de Plasticidade**, Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro – RJ, 1994d.
- GERSCOVICH, D. M. S., **Resistência ao Cisalhamento**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/resistenciacisalhamento.pdf>>. Acesso em: 10 Maio, 2014.
- HEAD, K. H., **Manual of Soil Laboratory Testing**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, v.2, 1994.
- LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V., **Soil Mechanics**. 1 ed. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- MARANGON, M., **Tensões no Solo**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009. Disponível em: <[http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/ms2\\_unid02.pdf](http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/ms2_unid02.pdf)>. Acesso em: 21 Julho, 2014.
- MONTEIRO, F. F., **Avaliação do Efeito da Dimensão em Ensaios Triaxiais em Solos Arenosos**, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Fortaleza, Fortaleza - CE, 2014.
- PINTO, C. S., **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

## Agradecimentos

Agradecemos à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas do autor <sup>1</sup> e da coautora <sup>2</sup> respectivamente.