



Comparativo Entre o Ensaio de Cisalhamento Direto e o *Borehole Shear Test* na Obtenção dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento dos Solos

Rodrigo Torquato Domingues
UFSC, Florianópolis, Brasil, rodrigotorquatodomingues@gmail.com

Regiane Mara Sbroglia
UFSC, Florianópolis, Brasil, regi_sb@hotmail.com

Julio Antonio Nardi Rigotti
UFSC, Florianópolis, Brasil, julio.rigotti@gmail.com

Jéssica Huller
UFSC, Florianópolis, Brasil, jessicahuller2015@gmail.com

Caroline Ester Christ
UFSC, Florianópolis, Brasil, carolesterc@yahoo.com.br

Rafael Augusto dos Reis Higashi
UFSC, Florianópolis, Brasil, rrhigashi@gmail.com

RESUMO: O *Borehole Shear Test* (BST) é um ensaio de campo executado para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, coesão e ângulo de atrito. Esse ensaio possui como maior vantagem a sua facilidade de execução, pois não necessita de coleta de amostras indeformadas, sendo executado in situ. Esta pesquisa teve como objetivo comparar os ensaios e resultados do Cisalhamento Direto e BST. Para garantir a homogeneidade das amostras, foram confeccionados corpos de prova com areia, cal e água e os ensaios foram executados em corpos de prova de igual massa específica aparente seca. Os ensaios foram executados na condição consolidada drenada e nas mesmas tensões normais de consolidação. Os resultados dos ensaios foram plotados em um gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal e analisados. Dessa forma, foi possível observar que as envoltórias de ruptura apresentaram correlações satisfatórias e, como resultado, obtiveram-se valores dos parâmetros de resistência bastante semelhantes, principalmente os valores de coesão.

PALAVRAS-CHAVE: *Borehole Shear Test*, Cisalhamento Direto, Comparativo, Resistência ao Cisalhamento.

1 INTRODUÇÃO

A Geotecnia é o ramo da Engenharia Civil que caracteriza, mensura e interpreta o

comportamento dos solos e rochas, bem como estuda e aplica técnicas para soluções de engenharia. Para a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos são



utilizados instrumentos capazes de quantificar as grandezas de resistência. Dois desses equipamentos são: o Cisalhamento Direto e o *Borehole Shear Test* (BST).

O ensaio mais antigo que fornece os parâmetros de resistência do solo é o Cisalhamento Direto (DAS, 2006); esse ensaio é amplamente utilizado no Brasil, pois gera resultados satisfatórios e relativamente rápidos. Embora o ensaio de Cisalhamento Direto seja rápido, ele requer a coleta de uma amostra indeformada do solo para análise em laboratório. Por outro lado, o *Borehole Shear Test* pode gerar resultados em campo, o que facilita e agiliza o processo de determinação dos parâmetros de resistência (LUTENEGGER; TIMIAN, 1987 apud CAMAREZ, 2017).

A vantagem do ensaio BST é permitir a análise de uma área maior em um menor tempo e gerar menos perturbação na estrutura do solo, logo, a agilidade com que os ensaios BST são executados é o fator determinante para que estudos sobre esse equipamento e seus resultados sejam realizados.

Nesse contexto, este artigo tem como objetivo a comparação entre os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ), em corpos de prova fabricados em laboratório a partir de uma mistura compactada de areia fina, cal e água.

Em função da característica granulométrica dos corpos de prova, os valores de c e ϕ foram obtidos por meio dos ensaios Cisalhamento Direto e *Borehole Shear Test* a fim de validar a utilização do equipamento BST em solos arenosos do estado de Santa Catarina.

2 ENSAIOS PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS

2.1 Cisalhamento Direto

O ensaio de Cisalhamento Direto pode ser dividido em dois estágios, o primeiro é a consolidação. Consolida-se o corpo de prova por meio da aplicação da tensão normal (σ_v), que é mantida constante; e o segundo estágio é o do cisalhamento. Com o auxílio de uma máquina de deformação controlada, imprime-se um deslocamento à seção inferior de uma caixa bipartida, aplicando-se a tensão cisalhante (τ) que é aumentada, gradativamente, até produzir a ruptura do corpo de prova por cisalhamento ao longo do plano de contato entre as duas seções da caixa. A velocidade de ruptura constante é condicionada ao tipo de solo ensaiado e conforme o tipo de ensaio (consolidado drenado - CD, consolidado não-drenado - CU) pode ser permitida a drenagem da amostra.

O resultado do ensaio de Cisalhamento Direto em um corpo de prova pode ser descrito como um par de coordenadas no plano cartesiano, onde o eixo das ordenadas representa a tensão cisalhante (τ) e o eixo das abscissas representa o deslocamento horizontal (ϵ_h). No entanto, repetindo-se o ensaio para outros corpos de prova a partir de tensões normais diferentes, obtém-se um conjunto de pares de valores (σ , τ) para cada estágio, onde o eixo das ordenadas representa a tensão cisalhante máxima (τ_{max}) e o eixo das abscissas representa a tensão normal (σ_n). Esses pares de valores são plotados em um sistema cartesiano $\tau = f(\sigma)$, assim, obtém-se a envoltória de resistência. A envoltória, então, permite determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento, c e ϕ , por meio do critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Figura 1).

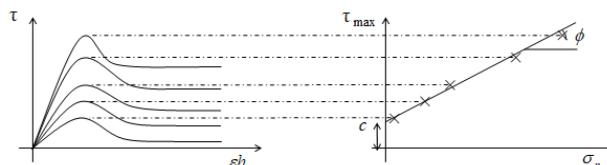


Figura 1. Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.

A Figura 2 apresenta o equipamento de Cisalhamento Direto do Laboratório de



Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) com destaque a alguns componentes.

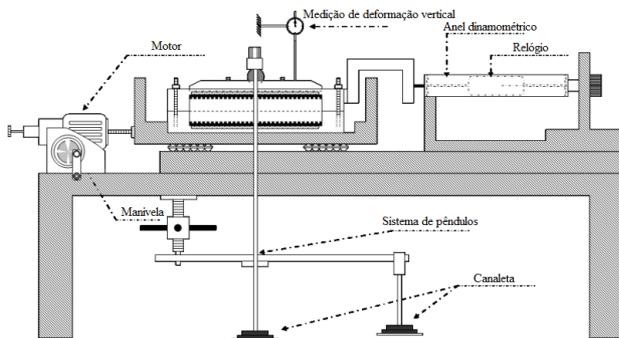


Figura 2. Equipamento de Cisalhamento Direto. Fonte: modificado de Higashi (2014)

2.2 Borehole Shear Test

Para a realização do ensaio, inicialmente faz-se um furo no solo com auxílio de um trado pedológico. Após a tradagem, insere-se a sonda cisalhante até a profundidade a qual se deseja ensaiar. A profundidade do furo pode variar conforme o objetivo do ensaio. Em cada estágio, aplicam-se tensões normais por meio de um manômetro com bomba manual. A sonda se expande e a carga aplicada nas placas é transferida para a parede do solo. Assim, deve-se esperar o tempo de consolidação que, de acordo com as instruções dos idealizadores do equipamento, varia entre 5 a 15 minutos, conforme a granulometria do solo.

A resistência ao cisalhamento do solo é medida por meio do arrancamento da sonda a uma velocidade controlada de 2 rotações da manivela (no sentido horário) por segundo. A tensão de cisalhamento máxima registrada indica a ruptura por cisalhamento. A obtenção dos parâmetros de resistência do solo, c e ϕ , é realizada de maneira análoga ao ensaio de Cisalhamento Direto, por meio do método de Mohr-Coulomb, sendo plotados os resultados obtidos em cada estágio em um gráfico de tensão cisalhante (τ) versus tensão normal (σ).

Embora não haja profundidade máxima teórica até onde o ensaio pode ser executado,

existe a dificuldade em se atingir grandes profundidades; fato decorrente do número de hastes rosqueáveis que deveriam ser empregadas para alocar a sonda cisalhante em regiões profundas, como também, a profundidade máxima que o trado pedológico é capaz de escavar. Segundo o manual do equipamento fornecido pela empresa *Handy Geotechnical Instruments*, quando mais de 10% do solo em questão é composto por pedregulho se torna difícil escavar um furo adequado para a introdução da sonda cisalhante e que partículas de pedregulho em contato com as placas cisalhantes reduzem a qualidade dos resultados do ensaio.

A Figura 3 apresenta o equipamento do *Borehole Shear Test* com destaque a seus componentes.

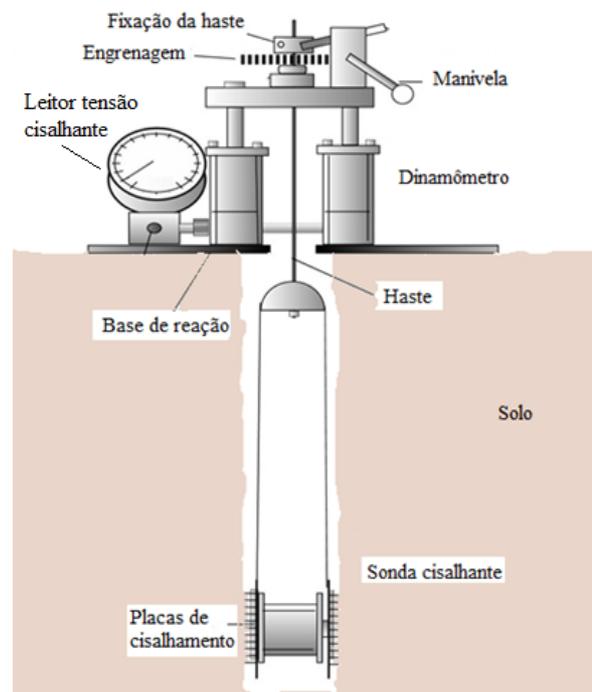


Figura 3. Equipamento *Borehole Shear Test*. Fonte: modificado de *Handy Geotechnical Instruments, Inc.*

2.3 Estudos com comparação entre os ensaios de Cisalhamento Direto e *Borehole Shear Test*

O BST foi adquirido pelo Laboratório de Mapeamento Geotécnico (LAMGEO) da



Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e como se trata do único equipamento brasileiro existente e sua utilização ser recente, existem poucos estudos comparando os dados dos ensaios de Cisalhamento Direto e BST a fim de validar sua utilização, principalmente em locais que demandam elevado número de ensaios.

Nesse sentido, Contessi (2016) teve como objetivo em seu trabalho analisar a relação entre os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto e *Borehole Shear Test* em corpos de prova compactados em laboratório. O autor realizou a ruptura em estado de umidade natural e inundado, nas mesmas condições de drenagem e com faixas de tensões normais muito próximas das aplicadas para cada envoltória. Segundo Cotessi (2016), a análise dos resultados mostrou valores dos parâmetros de resistência bastante semelhantes, com envoltórias paralelas e valores de intercepto coesivo próximos. Dessa forma, o autor concluiu que não há desconfiança na validade dos resultados do BST, uma vez que estes se mostraram bastante próximos e coerentes entre si, havendo possíveis variações decorrentes dos procedimentos de ambos os ensaios que poderiam afetar a estrutura do solo.

Sakamoto et al. (2016) realizaram ensaios nos solos das unidades geotécnicas Podzólico Vermelho Amarelo de substrato granito e Gleisolo de substrato sedimentos quaternários aluvionares da bacia hidrográfica do Itacorubi localizada em Florianópolis. De acordo com os autores, os ensaios em campo em estado inundado apresentaram valores similares para o ângulo de atrito, no entanto, para o estado natural e para os valores de coesão ocorreram diferenças significativas.

Sbroglia et al. (2018), por sua vez, analisando os dados obtidos pelos ensaios de Cisalhamento Direto e *Borehole Shear Test* em amostras de solos residuais dos estados do Rio de Janeiro e Santa Catarina, concluíram que as envoltórias de ruptura, em iguais condições de

drenagem e tensões normais, apresentaram correlações satisfatórias e, como resultado, obtiveram parâmetros de resistência bastante semelhantes e coerentes com os valores apontados pela literatura para solos residuais. Os autores observaram variações mais significativas no parâmetro de coesão.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos por Contessi (2016), Sakamoto et al. (2016) e Sbroglia et al. (2018) para os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos pelos ensaios de Cisalhamento Direto e BST realizados nas condições de drenagem natural e inundada.

Tabela 1. Variação (V) entre resultados de coesão e ângulo de atrito para os ensaios de Cisalhamento Direto (CD) e *Borehole Shear Test* (BST) nas condições natural (N) e inundada (I).

	Tipo de solos	Coesão [kPa]			Ângulo de atrito [graus]		
		CD	BST	V	CD	BST	V
I	Residual de Granito ¹	9,4	13,1	3,7	35,7	46,5	10,8
N	Residual de Granito ¹	22,8	14,5	8,3	43,5	45,1	1,6
N	Residual de Granito ²	7,4	21,0	13,6	38,0	43,1	5,1
I	Residual de Granito ²	3,8	4,0	0,2	34,4	32,6	1,8
N	Residual de Granito ²	18,4	9,0	9,4	42,1	26,6	15,5
I	Residual de Granito ²	5,4	1,0	4,4	35,8	35,6	0,2
N	Residual de Granito ²	51,3	13,0	38,3	54,2	42,6	11,6
I	Residual de Granito ²	18,2	6,0	12,6	28,8	35,0	6,2
N	Sedimentar ²	28,3	9,0	19,3	27,0	36,3	9,3
I	Sedimentar ²	5,1	0,0	5,1	29,4	35,6	6,2
I	Residual de Granitóide ³	1,0	3,6	2,6	41,5	39,3	2,2
I	Residual de Gnaisse ³	8,3	12,0	3,7	30,2	31,0	0,8
I	Residual de Migmatito ³	15,4	11,0	4,4	29,8	32,0	2,2
I	Residual de Granito ³	13,8	7,0	6,8	36,4	33,3	3,1
I	Residual de Granulito ³	14,7	16,6	1,9	30,8	34,7	3,9
I	Residual de Riolito ³	14,6	26,3	11,7	22,7	23,6	0,9

Fonte: ¹Contessi, 2016; ²Sakamoto et al., 2016; ³Sbroglia et al., 2018.



3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 Corpos de Prova

A fim de padronizar e reduzir a variabilidade das características geotécnicas dos solos ensaiados, foram confeccionados corpos de prova a partir de uma mistura compactada de areia fina, cal e água. A reação pozolânica proporcionada pelo contato da água com a cal gera coesão para a mistura e possibilita, após determinado período de tempo, a moldagem de corpos de prova mais homogêneos.

Inicialmente, foram testadas algumas amostras com diferentes proporções de material e, após testes tátil-visuais, foi determinado o traço padrão em peso (10 areia fina : 1,5 cal : 1,5 água), como observado na Figura 4. Todas as amostras foram misturadas manualmente até se alcançar a homogeneidade visual da mistura.



Figura 4. Teste tátil-visual com amostras de diferentes proporções de material.

A preparação das amostras para os ensaios foi conduzida pela NBR 6457 (Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização). Os ensaios de caracterização da areia foram: Análise Granulométrica (conforme NBR 7181 Solo - Análise Granulométrica) e Massa Específica (conforme NBR 6508 Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica).

3.2 Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de Cisalhamento Direto foi realizado conforme a *American Society for Testing and*

Materials (ASTM) D3080/1998, no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC (Figura 5).

Os corpos de prova foram posicionados na prensa de Cisalhamento Direto e foram rompidos na condição parcialmente saturada. A consolidação do corpo de prova se deu por meio da aplicação das tensões normais 20, 40, 60 e 80kPa, e admitiu-se o momento da estabilização das poropressões como o instante em que cessaram as variações na deformação vertical, aguardando-se no mínimo 1 hora para a execução do cisalhamento.

A etapa de cisalhamento ocorreu após a consolidação. O cisalhamento do corpo de prova ocorreu com a movimentação da caixa inferior da prensa de Cisalhamento Direto a uma velocidade padrão de 0,307 mm/min.



Figura 5. Execução do ensaio de Cisalhamento Direto.

3.3 Borehole Shear Test

O ensaio *Borehole Shear Test* foi realizado em conformidade com o procedimento de *Handy Geotechnical Instruments* (2017) e executado no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC (Figura 6). O corpo de prova utilizado foi a partir do solo compactado no interior do tubo de PVC.

Inicialmente, foi realizada a perfuração do solo por meio do trado pedológico com 75mm de diâmetro. A profundidade do furo para o posicionamento da sonda foi de



A massa específica dos sólidos (δ) foi de 2,65. De acordo com Caputo (1975) e Das (2007), apesar de normalmente situarem-se em torno de 2,70, os valores de δ podem variar, solos arenosos com grãos de quartzo, como é o caso do solo analisado, costumam apresentar valores de 2,65, solos argilosos e siltosos entre 2,60 e 2,90, solos orgânicos valores menores que 2,50 e argilas lateríticas, em virtude da deposição de sais de ferro, valores em torno de 3,0.

A média do peso específico natural (γ) dos corpos de prova no ensaio de Cisalhamento Direto foi de 16,80kN/m³. A magnitude do peso específico natural, calculado pela relação entre o peso total do solo e o seu volume total, depende da quantidade de água nos vazios e dos grãos minerais predominantes, e é utilizado no cálculo de esforços. A média dos valores do peso específico aparente seco (γ_d), por sua vez, obtido a partir da relação entre o peso dos sólidos e o volume total, foi de 14,94kN/m³. O valor do índice de vazios foi de 1,001.

Ao obter os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto e BST, foram geradas as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb as quais fornecem os parâmetros de resistência do solo ensaiado. A Tabela 3 apresenta as tensões normais aplicadas e as tensões cisalhantes correspondentes para cada estágio dos ensaios.

Tabela 3. Tensões normal e cisalhante nos ensaios.

Ensaio	Tensão normal [kPa]	Tensão cisalhante [kPa]
Cilhamento Direto	20	22
	40	42
	60	54
	80	69
Borehole Shear Test	20	21
	40	35
	60	46
	80	58

A partir das tensões normais versus tensão cisalhante em cada estágio dos ensaios de Cisalhamento Direto (CD) e *Borehole Shear*

Test (BST) foi elaborado o gráfico da Figura 10, o qual se pode observar as envoltórias de ruptura cujas equações são $\tau = 0,76.\sigma + 8,6$ e $\tau = 0,61.\sigma + 9,5$, respectivamente.

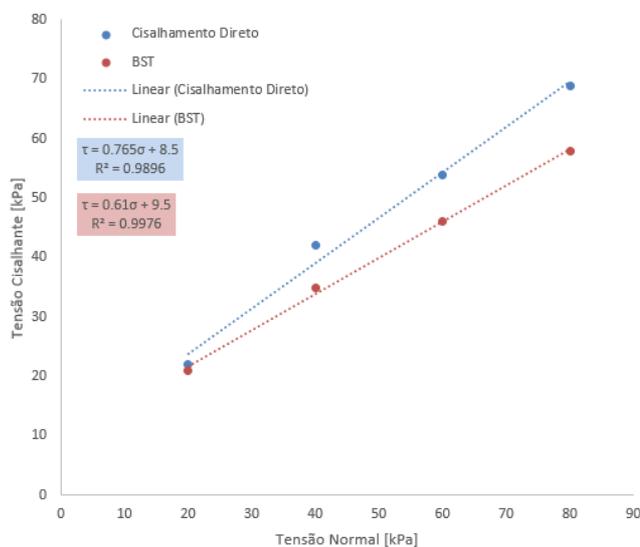


Figura 8. Gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal de cada ensaio.

A partir da Figura 8, observa-se a similaridade entre os resultados obtidos e correlações satisfatórias entre as envoltórias de ruptura. O coeficiente de regressão linear para os ensaios BST e CD foi próximo da unidade, o que indica a linearidade dos resultados.

Por meio das envoltórias de ruptura obtidas em cada ensaio foram determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, coesão e ângulo de atrito, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos obtidos pelos ensaios.

Ensaio	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
Cilhamento Direto	8,6	37,4
Borehole Shear Test	9,5	31,4

Os valores dos parâmetros de resistência apresentaram-se similares, entretanto, nota-se variação mais significativa entre os resultados



do ensaio de Cisalhamento e BST para o ângulo de atrito (ϕ). A variação no valor de ϕ entre os ensaios foi de 6° . Para os valores de coesão, esses se mostraram mais próximos, sendo sua variação de 0,9kPa.

As variações apresentadas neste estudo, em comparação com os resultados obtidos por Contessi (2016), Sakamoto et al. (2016) e Sbroglia et al. (2018), foram satisfatórios.

Entretanto, uma análise mais aprofundada pode ser realizada com os resultados de Contessi (2016), pois, assim como neste trabalho, os corpos de prova foram confeccionados em laboratório (a partir da homogeneização de um solo coletado em uma superfície de ruptura de deslizamento ocorrido em 2008 em Florianópolis) e o ensaio de campo *Borehole Shear Test* foi executado em laboratório. No entanto, diferentemente dos resultados obtidos neste trabalho, para os ensaios realizados na mesma condição (natural), a maior variação se deu entre os valores de coesão, de 8,3kPa, enquanto que para o parâmetro ângulo de atrito a variação foi de apenas $1,6^\circ$.

Pode-se concluir que, neste trabalho, as envoltórias de ruptura nos corpos de prova fabricados em laboratório, submetidos a iguais condições de drenagem e tensões normais (20, 40, 60 e 80kPa), apresentaram correlações satisfatórias e, como resultado, obtiveram-se valores de parâmetros de resistência semelhantes.

Ainda, observa-se que são aceitáveis possíveis variações nos resultados decorrentes dos procedimentos dos ensaios, principalmente no ensaio BST, em que a velocidade de ruptura é obtida manualmente.

5 CONCLUSÕES

O ensaio de Cisalhamento Direto em laboratório é o ensaio tradicionalmente mais conhecido e executado para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos. No

entanto, busca-se a utilização de outros métodos de investigação, sobretudo quando há a necessidade da determinação dos parâmetros de resistência de várias localidades, ou seja, o rompimento de vários corpos de prova, assim como no Mapeamento Geotécnico.

Dessa forma, o desenvolvimento desse artigo proporcionou uma comparação objetiva entre o ensaio de Cisalhamento Direto e *Borehole Shear Test*. O comparativo teve como propósito avaliar, em corpos de prova confeccionados em laboratório, os resultados para os ensaios CD e BST realizados nas mesmas condições de drenagem e submetidos a tensões normais iguais.

De acordo com os dados obtidos pelos ensaios de CD e BST, foi possível observar que os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento foram próximos, principalmente os valores de coesão. Desse modo, entende-se que não há a necessidade de criação de uma equação que correlacione os dados do BST com os do CD, sendo admissível os resultados obtidos diretamente pelo ensaio BST.

Conclui-se que o equipamento de campo *Borehole Shear Test* apresentou-se como uma alternativa viável, possibilitando a obtenção dos valores de coesão e ângulo de atrito interno de maneira simples e de forma mais rápida, quando comparado ao ensaio de Cisalhamento Direto. Contudo é necessário realizar maior número de ensaios para obter mais dados gerados pelo BST e, assim, validá-lo com menores incertezas.

Dessa forma, recomendam-se estudos comparando mais resultados de ensaios BST e a composição de um banco de dados. Também se recomenda estudos comparando os resultados do ensaio BST com o ensaio de Compressão Triaxial, realizados nas mesmas condições e em corpos de provas com iguais características.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. (2004)
ASTM D3080: Standard test method for direct shear



- test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, USA: ASTM.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986) *NBR 6457*: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 9 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984) *NBR 6508*: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. 10 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984) *NBR 7181*: Solo - Análise granulométrica. 10 p.
- Caputo, H.P. (1975) *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 5ª edição, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos.
- Caraméz, M.L. (2017) *Mapeamento geotécnico da microbacia do Itacorubi – Florianópolis/SC – aplicação do modelo SHALSTAB para a confecção de mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos de encostas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis.
- Contessi, R.J. (2016) *Borehole Shear Test: uma comparação com o ensaio de Cisalhamento Direto*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Das, B.M. (2007) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6ª edição, Ed. Thomson Learning, São Paulo.
- HANDY GEOTECHNICAL INSTRUMENTS. *BOREHOLE SHEAR™ TEST*. Madrid; 2013. p. 17-18.
- Handy, R.L.; Schmertmann, J.H.; Lutenegeger, A.J. (1985) *Borehole shear test in a shallow marine environment, Strength testing of marine sediments: laboratory and in-situ measurements*. ASTM STP 883, Chancy, R. C., Demars, K. R. (eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.140-153.
- HIGASHI, R.A.R., Apostila de Aula. 2014. UFSC, Florianópolis, SC.
- Sakamoto, M.Y. et al. (2016) *Use of a borehole shear test method for geotechnical mapping of landslide risk areas*. Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice – Aversa et al. (Eds). Associazione Geotecnica Italiana, Rome, Italy. p.1783-1790.
- Sbroglia, R.M. et al. (2018) *Use of Borehole Shear Test to Obtain Shear Strength Data: Comparison to Direct Shear Test*. In: XIII IAEG Congress, 2018, San Francisco. IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, v.6. Switzerland: Springer Nature. p.145-151.