

Estudo Multi-escala da Resistência ao Cisalhamento da Interface entre Geotêxtil Não Tecido e Solo.

Nelson Padrón Sánchez

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, nelsonwerpnnsn@gmail.com

Gregório Luís Silva Araújo

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, gregorio@unb.br

Ennio Marques Palmeira

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, palmeira@unb.br

RESUMO: Neste trabalho estudaram-se as resistências da interface de geotêxteis não tecidos de polipropileno com gramaturas de 300 e 800 g/m² com areia média mediante ensaios de cisalhamento em diferentes escalas empregando-se um equipamento de cisalhamento com uma caixa de 100 x 100 mm, outro com uma caixa de 300 x 300 mm de lado e um equipamento de plano inclinado com dimensões 1920 x 470 mm (comprimento x largura). Foram empregados três valores de tensões confinantes, sendo os valores de 25, 50 e 100 kPa para os dois primeiros equipamentos e 1,96, 3,94 e 6,09 kPa para o terceiro. A realização dos ensaios permitiu analisar e comparar resultados de mobilização da resistência, da influência do tipo de geossintético, deslocamentos, comportamento das envoltórias de ruptura e dos ângulos de atrito de interface. Os ângulos de atrito de interface obtidos para diferentes técnicas de ensaio são comparados e discutidos.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Resistência de Interface, Ensaio de Plano Inclinado, Aterros Sanitários.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a construção de obras de infraestrutura no Brasil tem crescido bastante. Tendo em vista a necessidade de melhoria da infraestrutura para viabilização do crescimento econômico do país, os valores investidos têm atingido patamares elevados, se comparados ao que se vinha investindo anteriormente. A construção de rodovias, portos, pontes viadutos e a construção do canal do Rio São Francisco têm gerado obras que têm levado a importantes impactos ambientais. Além disso, com a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, os municípios estão obrigados a dispor seus resíduos em aterros sanitários devidamente projetados e foram proibidos de depositar resíduos de construção civil nos aterros sanitários existentes. Neste contexto, algumas pesquisas foram realizadas objetivando o estudo do atrito nas interfaces de geossintéticos com

vários materiais, visando aplicações em obras de disposição de resíduos.

Neste trabalho estuda-se a resistência da interface entre dois geotêxteis não tecidos de polipropileno e areia média, mediante ensaios em diferentes escalas. Objetivou-se analisar e comparar resultados de mobilização da resistência de interface, influência do tipo de geossintético, deslocamentos, envoltórias de ruptura e dos ângulos de atrito de interface em função do tipo e escala do ensaio.

1.1 Parâmetros da Interface

Ensaio de cisalhamento direto são os mais comumente empregados na obtenção de parâmetros de interface para obras em que a resistência de interface é importante. Entretanto, a utilização de baixos níveis de tensão em ensaios de cisalhamento direto convencionais pode gerar erros grosseiros e fornecer resultados

desfavoráveis à segurança (Girard et al. 1990; Giroud et al. 1990; Gourc et al. 1996). Conforme os estudos de Aguiar (2003), Lima Júnior (2000), Martinez (2010), Mello (2001), Lopes (2000), Monteiro (2012) e Viana (2007), com experimentação laboratorial na análise de interface para variados materiais, os ensaios de rampa ou plano inclinado possibilitam estudos sob tensões normais reduzidas de maneira mais confiável.

1.2 Análise da Escala dos Ensaios.

A escala do ensaio para a determinação de parâmetros de interface foi analisada em alguns estudos, entre eles os de Aguiar (2003), Izgin e Wasti (1998), Koutsourais et al. (1991), Lalarakotoson et al. (1999), Mitchell et al. (1990) e Monteiro et al. 2014, realizando-se ensaios com dois tamanhos de caixa de cisalhamento para as interfaces estudadas.

As tensões normais utilizadas nos estudos antes citados foram iguais ou superiores a 20 kPa para os ensaios de **Cisalhamento Direto Convencional (CDC)** e para os ensaios de **Cisalhamento Direto Médio (CDM)**, realizados em caixa de 300 mm x 300 mm, enquanto para os ensaios de **Plano Inclinado (PI)** as tensões normais variaram em função do ângulo de inclinação durante o ensaio. Cada autor, em função das limitações dos equipamentos de PI, trabalhou com tensões normais diferentes e geralmente abaixo de 70 kPa, embora tenham seguido procedimentos de ensaio similares.

Nos ensaios de PI executados por Lima Júnior (2000), Mello (2001), Viana (2007), Monteiro (2012) e Monteiro et al. (2014) com o mesmo equipamento utilizado neste trabalho, utilizaram-se tensões normais iniciais abaixo dos 10 kPa, devido às limitações do equipamento.

Foram consultadas alguns trabalhos visando-se um melhor entendimento das envoltórias de ruptura sob distintas escalas, entre elas as de Mitchell et al. (1990), Izgin e Wasti (1998), Koutsourais et al. (1991) e Monteiro (2012), comparando os ensaios de CDC e PI, e por último as análises de Aguiar (2008) e Lalarakotoson et al. (1999), comparando os ensaios de CDM e PI. Até o momento, os autores não encontraram nenhum estudo que

compare as três escalas em análises deste tipo de problema.

1.3 Influência da Metodologia de Ensaio de Plano Inclinado.

A norma brasileira NBR ISO 12957.2 (ABTN, 2013) para ensaios em plano inclinado estabelece duas possíveis metodologias (i) equipamento com base rígida (rugosa) e (ii) equipamento com base preenchida com solo. Estas metodologias foram estudadas por Gourc et al. (1996) em outros tipos de interface (geogrelhas espessas/solo), recomendando a colagem de um material rugoso, previamente definido, buscando-se uma rugosidade semelhante à do solo.

Lopes (2000), em ensaios com caixa inferior preenchida com solo quando comparado com ensaios sem caixa inferior, ou seja, o geossintético sobre a base rígida, só encontrou um aumento do ângulo de atrito de 3% em interfaces de geotêxtil não tecido agulhado com dois tipos de areia; também, registrou um decréscimo no valor do ângulo de atrito quando aumentou a tensão de confinamento (normal) desde 5 até 25 kPa.

Além das duas metodologias apresentadas acima, a discussão sobre se a interface do geossintético com a base rígida nos ensaios deve ser fixa ou livre, para o geossintético se deformar ou não durante o ensaio, tem a ver diretamente com o comportamento do geossintético nas situações da obra.

A metodologia da norma NBR ISO 12957.2 (ABTN, 2013) para limitar qualquer deslocamento relativo entre o geossintético e o plano no caso de ensaios com base rígida estabelece o uso de lixa de esmeril abrasiva P100 para ensaios com geotêxteis.

2 MATERIAIS

Foram estudadas as interfaces entre solo e geotêxtil não tecido agulhado. Na Tabela 1 apresentam-se propriedades da areia utilizada e na Figura 1 apresenta-se sua curva granulométrica. Os resultados foram obtidos segundo as normas NBR 12004 MB - 3324 (ABNT, 1990); NBR 12051 MB-3388 (ABNT,

1991); NBR 6508 (ABNT, 1984) e NBR 7181 (ABNT, 1984):

Tabela 1. Propriedades da areia.

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa específica dos sólidos	2,710	g/cm ³
Massa específica mínima	1,457	g/cm ³
Massa específica para I _D	1,590	g/cm ³
Massa específica máxima	1,707	g/cm ³
Índice de vazios mínimo	0,588	-
Índice de vazios para I _D	0,705	-
Índice de vazios máximo	0,860	-

Nota: (I_D) Índice de densidade.

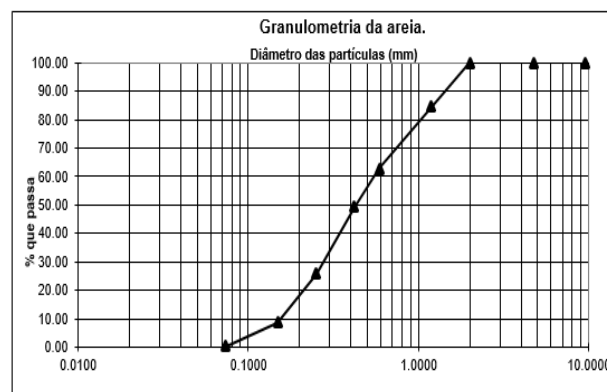


Figura 1. Curva granulométrica da areia média.

A tabela 2 apresenta as propriedades dos geotêxteis, segundo o fabricante

Tabela 2. Propriedades dos geotêxteis fornecidas pelo fabricante.

Propriedades			Normas	Unidades	Valores	
					PP300	PP600
Propriedades mecânicas		Tração à rotura - T	NBR 12824	kN/m	14	30
	Resistência a tração faixa larga.	Elongação – T		%	>50	>50
		Tração á rotura L		kN/m	13	28
		Elongação - L		%	>50	>50
	Resistência ao puncionamento CBR		NBR13359	kN	2,4	5,2
Propriedades físicas	Gramatura		NBR 12568	g/m²	300	600
	Largura			m.	3,50	3,50
	Matéria Prima		100% polipropileno aditivado anti UV			
	Resistência ao raio ultravioleta (% de resistência retida após 500 horas)				>70	>70

Notas: Os valores enunciados correspondem a medida de ensaios feitos em diversos laboratórios. O material fabricado com 100% polipropileno virgem e mantém as propriedades de resistência química e biológica características do polipropileno. As normas são referenciadas no catálogo do fabricante (BIDIM).

Foi determinada a massa por unidade de área ou gramatura no laboratório usou-se a norma ABNT NBR ISO 9864 (2013) e foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados de ensaios de gramatura (g/cm²).

Geotêxtil não tecido	Valor médio	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
PP300	304	9	2,95
PP600	793	27	3,44

Devido que os valores de gramatura para o PP600 obtidos foram maiores do esperado, se nomeou de PP800.

3 METODOLOGIA

Para os três tipos de ensaios, utilizaram-se os equipamentos disponíveis no Laboratório de Geotecnia do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, que são mostrados na Figura 2.

Nos ensaios de plano inclinado o geotêxtil foi instalado acima de lixa abrasiva P80 e, sobre ele, a areia média com massa específica de 1,59 g/cm³ correspondente a um valor de densidade relativa de 57%. Após se aplicar a tensão normal inicial com inclinação de zero graus e instalar a instrumentação, iniciou-se o ensaio.

3.1 Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional, em Caixa de 100 mm x 100 mm.

A velocidade do ensaio empregada foi 0,5

mm/min e as pressões normais aplicadas foram 25, 50 e 100 kPa, conforme norma D3080M (ASTM 2011). O critério de finalização dos ensaios foi deslocamento horizontal de 50 mm ou cisalhamento da interface, o que acontecesse primeiro. A fixação do geotêxtil foi garantida com resina epóxi colando-o à caixa inferior.

3.2 Ensaio de cisalhamento direto médio, em caixa de 300 cm x 300 cm.

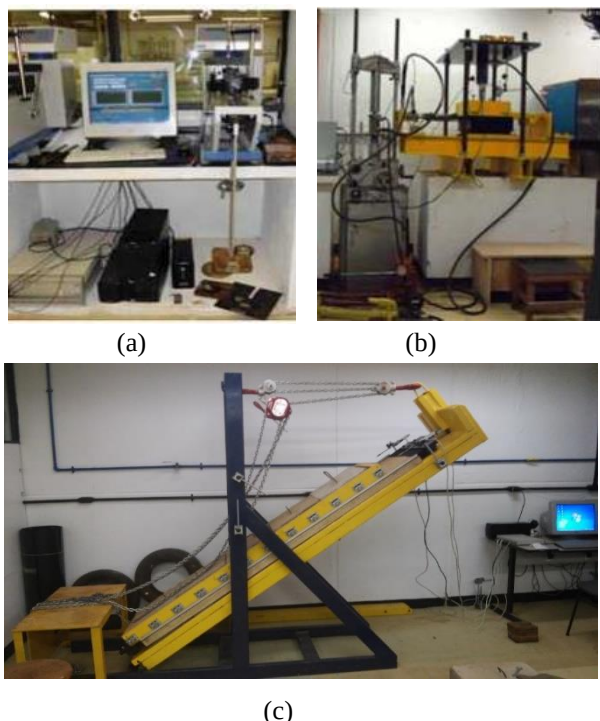


Figura 2. Equipamentos utilizados para o estudo de interface: (a) Cisalhamento direto convencional, (b) Ensaio de cisalhamento direto em escala média e (c) Ensaio de plano inclinado.

A velocidade do ensaio utilizada foi 0,5 mm/min e as tensões normais 25, 50 e 100 kPa, conforme norma NBR ISO 12957.1 (ABTN, 2013). O critério de finalização dos ensaios foi deslocamento horizontal de 50 mm ou cisalhamento da interface, o que acontecesse primeiro.

Para diminuir o efeito do atrito da areia com as faces internas verticais da caixa superior, utilizado um sistema de lubrificação como representado na Figura 3, que foi utilizado com bons resultados por Palmeira (1987).

Nos ensaios de cisalhamento direto o geotêxtil foi ancorado à caixa inferior.

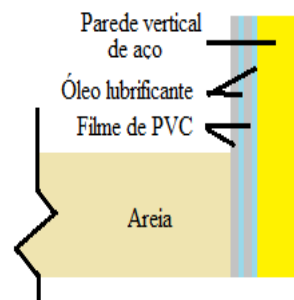


Figura 3. Sistema de lubrificação da parede vertical de aço da caixa superior de cisalhamento de 300 cm x 300 cm.

3.3 Ensaio de Plano Inclinado.

A velocidade de elevação do plano foi de $3 \pm 0,5$ °/minuto e os valores de tensão normal inicial (com inclinação 0°) foram 1,96, 3,94 e 6,09 kPa, conforme norma ABTN NBR ISO 12957.2 (2013). Utilizou-se equipamento com base rígida e caixa sobre roletes. O critério de finalização dos ensaios foi deslocamento horizontal de 50 mm da caixa (192 cm x 47 cm) preenchida com solo. As tensões normal e cisalhante ($\sigma_{\eta,\beta}$ e $\tau_{\eta,\beta}$) foram calculadas seguindo as fórmulas da norma.

A ancoragem do geotêxtil foi garantida mediante garras metálicas, além da lixa sobre a base rígida. A eficiência do sistema foi comprovada mediante uma célula de carga solidária à garra superior, que registrou valores nulos de tração no geotêxtil.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Evolução dos Deslocamentos

Neste estudo conseguiu-se medir o deslocamento relativo entre a caixa e a rampa de forma isolada em função da inclinação da rampa. Isso foi possível devido à inserção da lixa colocada entre a base da rampa e geotêxtil, o que diminui ou evita o efeito da deformação de tração do geotêxtil.

Nas Figuras 4 e 5, observa-se como, independentemente da tensão normal e do tipo de interface, os resultados de deslocamentos da caixa foram praticamente os mesmos, com incertezas aceitáveis para este tipo de ensaio.

Entretanto, nos ensaios de plano inclinado

realizados, o comportamento foi diferente ao encontrado às pesquisas consultadas e comentadas anteriormente Lima Júnior (2000) e Mello (2001). Vale ressaltar que as condições de fronteira entre geossintéticos e solos foram diferentes, devido à utilização de lixa entre a base rígida e o geotêxtil em este trabalho.

Para o caso de esta pesquisa, os deslocamentos iniciam-se a partir dos 10 graus de inclinação, mas a ruptura acontece rapidamente, com valores de deslocamentos baixíssimos (aproximadamente 2 mm de deslocamento relativo caixa-rampa).

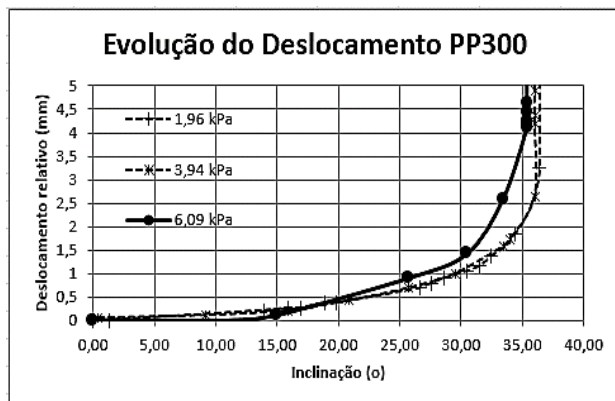


Figura 4. Evolução dos deslocamentos PP300.

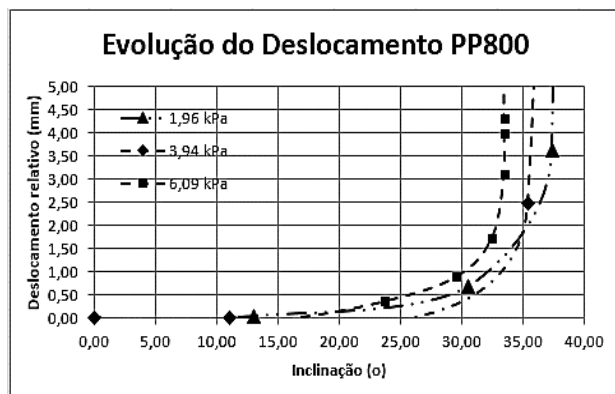


Figura 5. Evolução dos deslocamentos PP800.

Na Figura 6 é feita a comparação com resultados de pesquisas anteriores que avaliaram interfaces similares. Pode-se observar a importância das condições de fronteira do ensaio, nas duas curvas à esquerda (pesquisas anteriores) inclui na leitura dos medidores de deslocamento a deformação do geotêxtil produto a tração durante a inclinação da rampa.

Por sua vez, quando se utiliza a lixa P80 colada na base rígida, a deformação do geotêxtil é quase zero, fazendo que o momento da ruptura

da interface seja em um tempo mais curto (duas curvas da direita na Figura 6).

Independentemente da gramatura do geotêxtil e para as condições ensaiadas os deslocamentos quase na ruptura foram muito pequenos, gerando uma curva com tendência bi-linear para ensaios com base rugosa, como mostrado na Figura 6.

Informações adicionais das curvas da Figura 6, são apresentadas na Tabela 4.

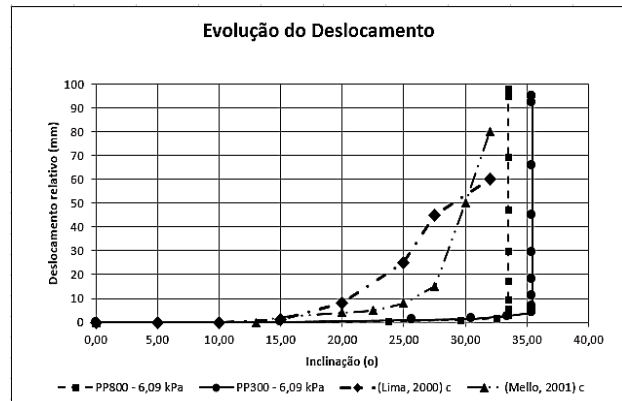


Figura 6. Evolução dos deslocamentos em interfaces com lubrificação e sem.

As curvas das pesquisas anteriores apresentadas na Figura 6, têm tendências similares às curvas dos ensaios de este trabalho, com curvas mais suavizadas e com ângulos de inclinação um pouco inferiores na ruptura, o que se atribui ao efeito da deformação do geotêxtil e ruptura progressiva ao longo da interface no caso de plano com superfície sem lixa.

Tabela 4. Descrição de pesquisas em condições similares.

Referências	Solo, areia:	Geotêxtil não tecido	Massa/Área. (g/cm²).
Lima Júnior (2000)	Grossa	PP	300
Presente Trabalho	Media	PP	300,800
Mello (2001)	Fina	PP	300

4.3 Envoltórias e Ângulos de Atrito.

Na Tabela 5 apresentam-se os resultados dos ensaios executados. As envoltórias de ruptura de interface são apresentadas na Figura 7, onde pode-se observar que os resultados são bem próximos para os três ensaios no que se refere ao ângulo de atrito.

Deve-se notar que no ensaio de plano inclinado os valores da tensão normal (σ), são variáveis com a inclinação da rampa, uma vez que o equipamento utilizado, não apresenta as faces

laterais orientadas para se assegurar a tensão normal, como estabelece a norma NBR ISO 12957.2 (ABTN, 2013).

Dado que os resultados das envoltórias para os dois ensaios de plano inclinado foram praticamente os mesmos, somente foi apresentada uma envoltória com o objetivo de melhorar a identificação daquelas referentes aos demais ensaios na Figura 7.

Não se observam diferenças significativas de ângulo de atrito quando comparados os três ensaios em diferentes escalas. Pode-se observar na Tabela 5 que os ângulos de atrito são ligeiramente menores nos ensaios de plano inclinado.

Tabela 5. Resultados de ensaios de cisalhamento direto.

Ensaio	Geotêxtil	σ (kPa)	τ (kPa)	ϕ (°)
Cisalhamento Direto Convencional. (CDC)	PP300	26,10	20,80	36
		51,00	39,26	
		51,00	35,57	
		100,00	73,15	
	PP800	26,10	21,49	39
		51,00	39,07	
		51,00	42,45	
		100,00	73,26	
Cisalhamento Direto Médio (300 cm x 300 cm) (CDM)	PP300	30,29	23,77	37
		60,61	47,66	
		120,39	91,60	
	PP800	29,59	20,63	35
		59,34	41,96	
		118,73	84,12	
Plano Inclinado	PP300	1,57	1,13	35
	=	3,21	2,28	
	PP800	4,96	3,53	

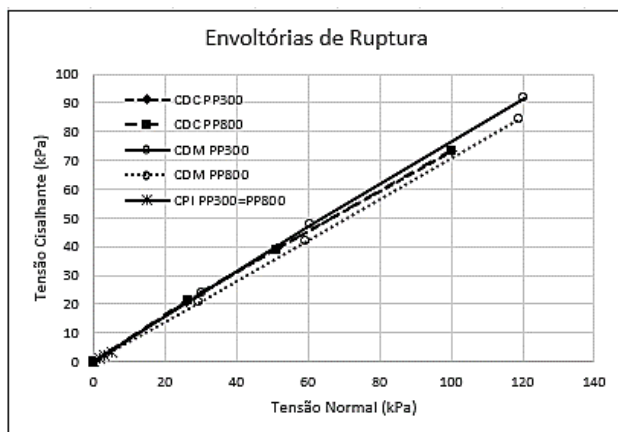


Figura 8. Envoltórias de ruptura.

Baseando-se nos resultados obtidos, pode-se observar que as interfaces de areia média/GNT-

PP300 e areia média/GNT-PP800 apresentam a mesma resistência ao cisalhamento de interface, com um ângulo de atrito de interface de 36°.

O ângulos de atrito obtidos dos ensaios foram próximos, indicando que a diferença escala ou tamanho da superfície de contacto na interface, não influi significativamente, para os materiais e as condições de fronteira ensaiados. Essa pequena diferença entre ângulos de atrito pode ser atribuída às condições de baixa compactação do solo ensaiado

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou resultados de ensaios de resistência de interfaces solo-geotêxtil obtidos em diferentes equipamentos e condições de fronteira. Com base nos resultados obtidos, para o caso de uma superfície rugosa abaixo do geotêxtil, a ruptura da interface nos ensaios de plano inclinado aconteceu para pequenos deslocamentos relativos, particularmente quando comparados aos obtidos em outras pesquisas que permitiram a deformação do geotêxtil

Para os ensaios realizados, observou-se que a escala do ensaio não influenciou significativamente nos resultados de ângulo de atrito de interface, observando-se envoltórias de ruptura de interface muito próximas, também, independentemente da gramatura do geotêxtil não tecido ensaiado.

Os ângulos de atrito de interface obtidos pelos diferentes equipamentos foram próximos, apesar dos diferentes níveis de tensões empregados nos ensaios. Entretanto, deve-se notar que a amostra de solo ensaiado apresentava baixa compactação, o que pode explicar a proximidade de valores de ângulo de atrito.

AGRADECIMENTOS

Os autores registram seus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq pelo financiamento, ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e ao fabricante dos geotêxteis ensaiados.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1990). ABNT NBR 12004 MB – 3324: *Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*, Rio de Janeiro, RJ, 6p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). ABNT NBR 12051 MB-3388: *Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*, Rio de Janeiro, RJ, 14p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). ABNT NBR 6508: *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica*, Rio de Janeiro, RJ, 8p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). ABNT NBR 7181: *Solo - Análise granulométrica*, Rio de Janeiro, RJ, 13p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). ABNT NBR ISO 12957.1: *Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto*, Rio de Janeiro, RJ, 8p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). ABNT NBR ISO 12957.2: *Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 2: Ensaio de Plano Inclinado*, Rio de Janeiro, RJ, 12p.
- Aguiar, V.R. (2003). *Ensaio de Rampa para Estudo da Resistência de Interfaces Solo-Geossintético*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 121 p.
- Aguiar, V.R. (2008). *Resistência de Interfaces Solo-Geossintético - Desenvolvimento de Equipamento e Ensaio*. Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 373 p.
- American Society for Testing and Materials, ASTM D3080/D3080M-11: *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. 2011. 9p.
- Girard, H., Fischer, S. & Alonso, E. (1990). Problems of friction posed by the use of geomembranes on dam slopes—examples and measurements. *Geotextiles and Geomembranes*, 9(2): 129–143.
- Giroud, J., Swan, R., Richter, P. & Spooner, P. (1990). Geotextiles, geomembranes, and related products: *proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes, and Related Products*, The Hague, 28 May - 1 June 1990. A.A. Balkema, Rotterdam; Brookfield.
- Gourc, J.P., Lalarakotoson, S., Müller-Rochholz, H. & Bronstein, Z. (1996). Friction measurement by direct shearing or tilting process - development of a European standard. *First European Geosynthetics Conference, EUROGEO 1*, (1): 1039-1046
- Izgin, M. & Wasti, Y. (1998). Geomembrane–sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 16(4): 207–219.
- Koutsourais, M.M., Sprague, C.J. & Pucetas, R.C. (1991). Interfacial friction study of cap and liner components for landfill design. *Geotextiles and Geomembranes*, 10(5-6): 531–548.
- Lalarakotoson, S., Villard, P. & Gourc, J.P. (1999). Shear Strength Characterization of Geosynthetic Interfaces on Inclined Planes. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, No.4. (22): 284 – 291.
- Lima Júnior, N.R. (2000). *Estudo da Interação Solo-Geossintético em Obras de Proteção Ambiental com o Uso do Equipamento de Plano Inclinado*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil, 148 p.
- Martínez, A.B.B. (2010). *Comportamento Resistente ao Deslizamento de Geossintéticos* (em Espanhol). Tese de Doutorado, Universidade de Cantabria, Espanha, 474 p.
- Mello, L.G.R. de (2001). *Estudo da Interação Solo-Geossintético em Taludes de Obras de Disposição de Resíduos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil, 137 p.
- Mello, L.G.R. De, Lima Júnior, N.R. & Palmeira, E.M. (2003). Estudo da interação entre interfaces de solos e geossintéticos em taludes de áreas de disposição de resíduos. *Soils and Rocks*, 1(26): 19–35.
- Mitchell, J.K., Seed, R.B. & Seed, H.B. (1990). Stability considerations in the design and construction of lined waste depositories. ASTM STP 1070, *Geotechnics of Waste Fills—Theory and Practice*, Philadelphia, pp. 209–224.
- Monteiro, C.B. (2012). *Estudo de Interface Solo-Geomembrana com Variações de Níveis de Saturação do Solo*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil, 131 p.
- Monteiro, C.B., Araújo, G.L.S. & Palmeira, E.M. (2014). Friction measurement by direct shearing or tilting process. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris. Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique*, 4 p.
- Palmeira, E.M. (1987). *The Study of Soil-Reinforcement Interaction by Means of Large Scale Laboratory Tests*. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Oxford, England, United Kingdom, 237 p.
- VIANA, H.N. De L. (2007). *Estudos da Estabilidade e Condutividade Hidráulica de Sistemas de Revestimento Convencionais e Alternativos para Obras de Disposição de Resíduos*. Tese de Doutorado, Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasil, 259 p.