

3 Programa Experimental

3.1. Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta o programa de ensaios realizado na presente pesquisa, bem como a descrição dos materiais, a preparação dos corpos de prova, a montagem e calibração do equipamento e os procedimentos experimentais.

Os ensaios foram particularmente realizados com o objetivo de obter os parâmetros de resistência de interação solo-geossintético e as eficiências das interfaces. Assim, definiu-se um programa de ensaios utilizando diferentes tipos de geossintéticos, submetido a diferentes tensões confinantes.

3.2. Materiais Utilizados

No programa experimental, utilizou-se um tipo de solo: pedregulho (brita) e dois tipos de geossintéticos: geogrelha de poliéster e geomembrana de PEAD. Para fins comparativos, os materiais escolhidos foram os mesmos usados por pesquisas anteriores na PUC-Rio.

3.2.1. Solo

A brita (BR) ensaiada é um pedregulho uniforme, de origem granito-gnáissica, com partículas compreendidas entre 0,42 mm e 9,25 mm de diâmetro, conhecido comercialmente como Brita Zero. Os pesos específicos, mínimo e máximo, são 13,80 e 16,42 kN/m³, respectivamente. A densidade relativa (D_r) foi de 15%, correspondendo a um peso específico de 14,14 kN/m³. A amostra representativa da brita está mostrada na Figura 22.

A Figura 23 apresenta a curva granulométrica da brita. A Tabela 9 e a Tabela 10 resumem algumas de suas características, como diâmetros máximo

($D_{m\acute{a}x}$) e mínimo ($D_{m\acute{i}n}$), os diâmetros D_{10} , D_{30} e D_{60} , os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c), os pesos específicos do solo (γ), o peso específico máximo ($\gamma_{m\acute{a}x}$), mínimo ($\gamma_{m\acute{i}n}$) e o referente à $D_r=15\%$ ($\gamma_{D_r=15\%}$), o ndice de vazios máximo ($e_{m\acute{a}x}$), mínimo ($e_{m\acute{i}n}$) e o referente à $D_r=15\%$ ($e_{D_r=15\%}$).

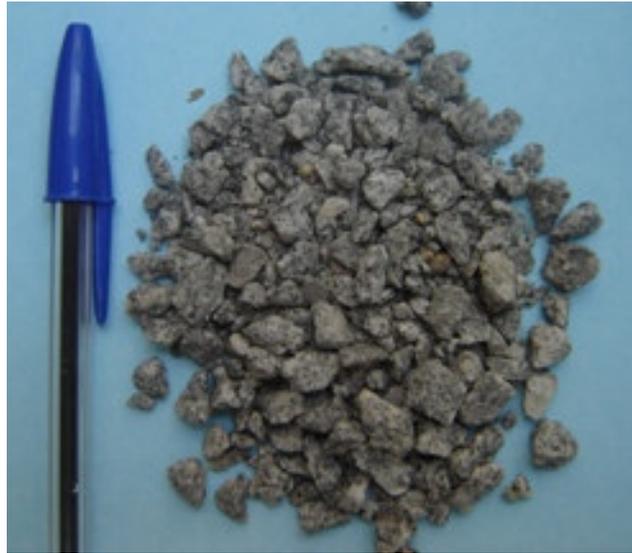


Figura 22 - Amostra representativa da brita ensaiada

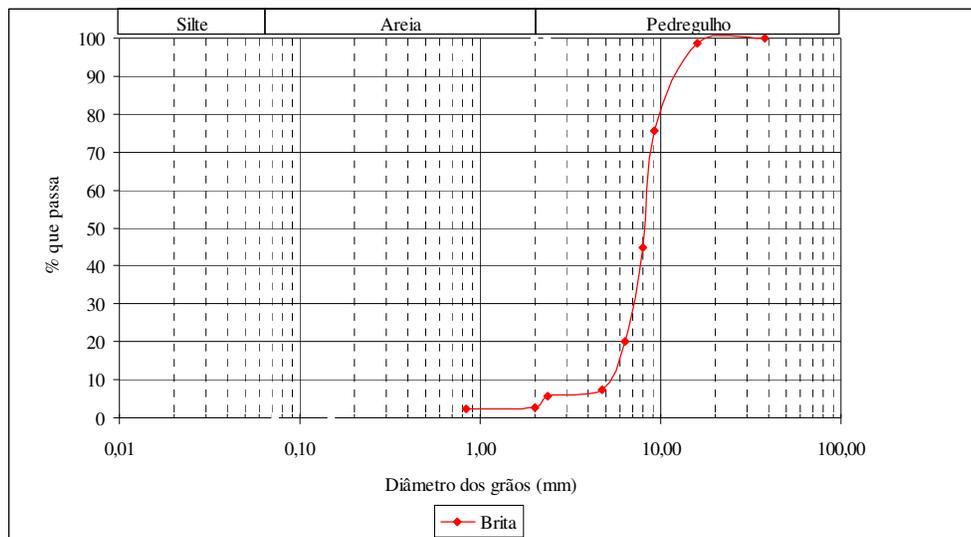


Figura 23 - Curva Granulométrica da Brita

Tabela 9 - Características granulométricas da brita

Solo	D_{\min}	D_{10}	D_{30}	D_{60}	D_{\max}	C_u	C_c
	(mm)						
Brita (BR)	0,42	2,85	5,60	7,00	9,53	2,46	1,57

Tabela 10 - Características físicas da brita

Solo	γ_s	γ_{\max}	$\gamma_{Dr=15\%}$	γ_{\min}	e_{\min}	$e_{Dr=15\%}$	e_{\max}
	(kN/m ³)						
Brita (BR)	25,8	16,42	14,14	13,80	0,57	0,83	0,87

A Figura 23 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-BR obtida a partir dos resultados do ensaio de cisalhamento direto em grandes dimensões. Os parâmetros obtidos foram: coesão (c) de 0 kPa e ângulo de atrito (ϕ) de 36,6°.

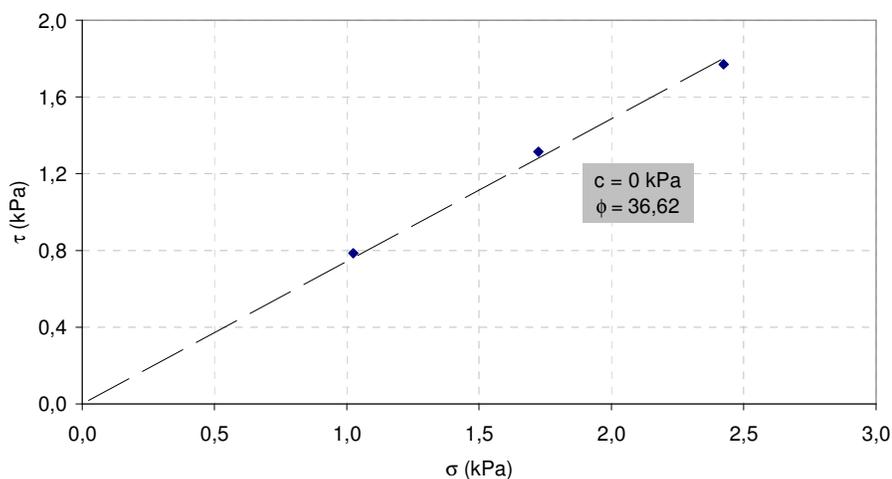


Figura 24 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

3.2.2. Geossintéticos

A geogrelha ensaiada (Figura 25) foi a Fortrac 35 MP, constituída de um poliéster de alta tenacidade, revestida de PVC. As propriedades físicas da GG foram fornecidas pelo fabricante (HUESKER) e estão apresentadas na Tabela 11.

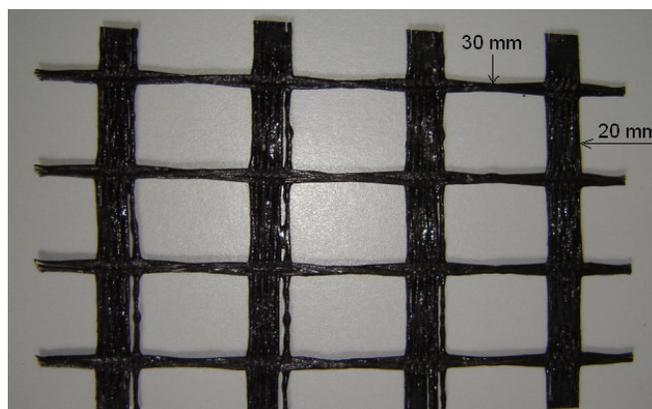


Figura 25 - Amostra representativa da Geogrelha (GG) ensaiada

Tabela 11 - Característica da Geogrelha Fortrac 35/25-20/30 (Huesker, 2008)

Característica	Valor	Norma
Abertura	20 x 30 mm	
Resistência à Tração	Longitudinal	35 kN/m
	Transversal	20 kN/m
Alongamento na Ruptura	4-6%	ASTM D 6637

A geomembrana utilizada (Figura 26) foi uma polimanta de PEAD lisa nas duas faces, com propriedades fornecidas pelo fabricante (ENGEPOL) listadas na Tabela 12.



Figura 26 - Amostra representativa da Geomembrana (GM) ensaiada

Tabela 12 - Característica da Geomembrana Polimanta (Engepol, 2007)

Propriedade	Método de Ensaio	Valor
Espessura Nominal	ASTM D 5199	1 mm
Densidade	ASTM D 792	$\geq 0,94 \text{ g/cm}^3$
Resistência à Tração:		
• No Escoamento		$\geq 15 \text{ kN/m}$
• Na Ruptura		$\geq 27 \text{ kN/m}$
• Alongamento no Escoamento	ASTM D 6693	$\geq 12 \%$
• Alongamento na Ruptura		$\geq 700\%$
Resistência ao Rasgo	ASTM D 1004	$\geq 125 \text{ N}$
Resistência ao Puncionamento	ASTM D 4833	$\geq 320 \text{ N}$

3.3. Preparação dos Corpos de Prova

As amostras foram preparadas seguindo a norma DIN EM 963. Esta recomenda que, do rolo de origem, seja desprezadas as duas primeiras voltas e 10 cm das laterais. As amostras, tanto de GM como de GG, tiveram dimensões de 1,5 de comprimento por 1,0 m de largura. Para cada ensaio foram confeccionadas amostras compatíveis com a configuração da caixa inferior, ou seja, largura de

0,5m e comprimento igual a 1,40m, 20 cm a mais que o comprimento da caixa para garantir a ancoragem na garra metálica.

Como a Dr da brita foi de 15%, não houve necessidade de compactação, pois o material alcançava os índices de vazios somente com o seu lançamento na caixa, com o auxílio de uma concha metálica (Figura 27a).

O método de preparação dos corpos de prova independe do tipo de ensaio, Inicia-se pela limpeza da caixa inferior, logo após, lança-se, cuidadosamente, o volume já conhecido de solo e nivela-se a superfície do solo deixando-a pronta para receber o geossintético, que era esticado e ancorado (Figura 27c).

Após a fixação do geossintético, coloca-se a caixa superior de ensaio, prende-se os limitadores de deslocamentos e instala-se a instrumentação (*tell-tale*). Então, lança-se o solo, repetindo o procedimento da caixa inferior (Figura 27d).



(a) Lançamento do solo



(b) Caixa inferior preenchida de solo



(c) Geossintético instalado



(d) Caixa superior preenchida de solo

Figura 27 - Preparação do corpo de prova

Para finalizar, aplica-se a tensão de confinamento utilizando uma tampa de madeira, e/ou placa de aço. Estas três tensões confinantes diferentes, causadas pelo solo, tampa e placa, possibilitaram a construção de uma envoltória de resistência e conseqüentemente, a obtenção dos parâmetros de resistência para as interfaces solo-solo e solo-geossintético. O espaçamento de 3mm era dado entre as caixas para garantir o livre deslizamento da caixa superior.

Para o ensaio de rampa e cisalhamento direto inclinado, é necessária a instalação do medidor de ângulo de base magnética. A Figura 28 apresenta a plataforma de ensaio de rampa pronta para iniciar o ensaio. Esta configuração é para a tensão confinante intermediária, com placa de madeira mais duas placas de aço.



Figura 28 - Conclusão da preparação do corpo de prova para o ensaio de rampa (tensão confinante intermediária)

Para os ensaios de cisalhamento direto convencional ou inclinado, é necessário instalar a plataforma de aplicação de força cisalhante (Figura 29a) e os grampos tipo C para bloquear o movimento da caixa durante a inclinação da plataforma (Figura 29b). Finalizando, instalam-se os anéis de carga e os suportes das roldanas, prendem-se os cabos de aço e nivela a plataforma de carga.



(a) Plataforma de aplicação de cargas (b) Grampo tipo C para unir as caixas

Figura 29 - Acessórios utilizados apenas para os ensaios: cisalhamento direto e inclinado

3.4. Equipamento

O equipamento utilizado na presente pesquisa foi desenvolvido por Aguiar (2008). Este equipamento consiste em uma estrutura metálica, composta por perfis que foram dimensionados e soldados para resistir aos esforços solicitantes. O equipamento apresenta dimensões de 2,5m de comprimento, 1,4m de largura e 2,5m de altura.

As caixas de ensaio apresentavam dimensões internas de 0,5m de largura por 1,0m de comprimento (superior) e 0,5m de largura por 1,2m de comprimento (inferior).

O uso de uma caixa inferior de maior dimensão justifica-se pelo fato de se manter sempre uma área de contato de $0,5\text{m}^2$ em qualquer momento do ensaio. Além disto, evita-se perda de materiais com o movimento da caixa. Esta diferença de comprimento corresponde ao deslocamento cisalhante máximo permitido pelo sistema. Ambas as caixas possuem altura útil de 0,1m.

Este conjunto de caixas de ensaio, com pequenas alterações e uso de diferentes acessórios, permite a realização dos três tipos de ensaios: ensaio de rampa (Figura 30), ensaio de cisalhamento direto convencional e ensaio de cisalhamento direto inclinado (Figura 31).

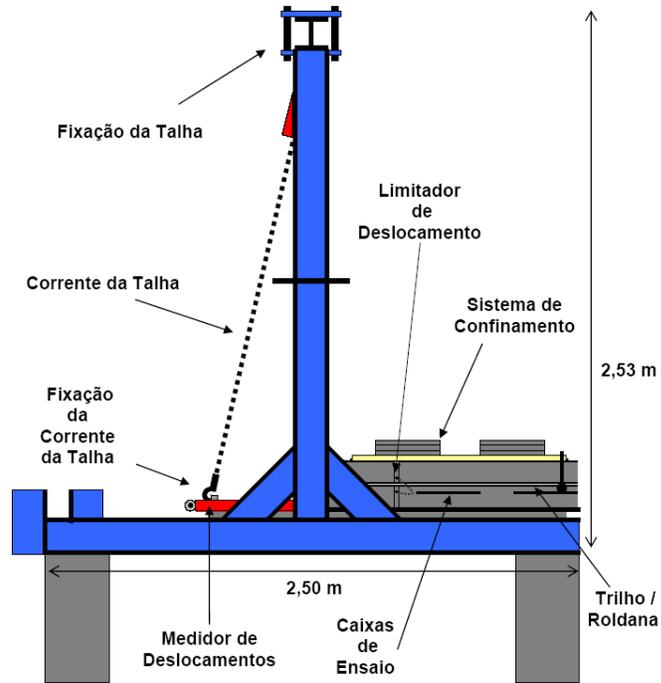


Figura 30 - Configuração para ensaio de Rampa (Aguiar, 2008)

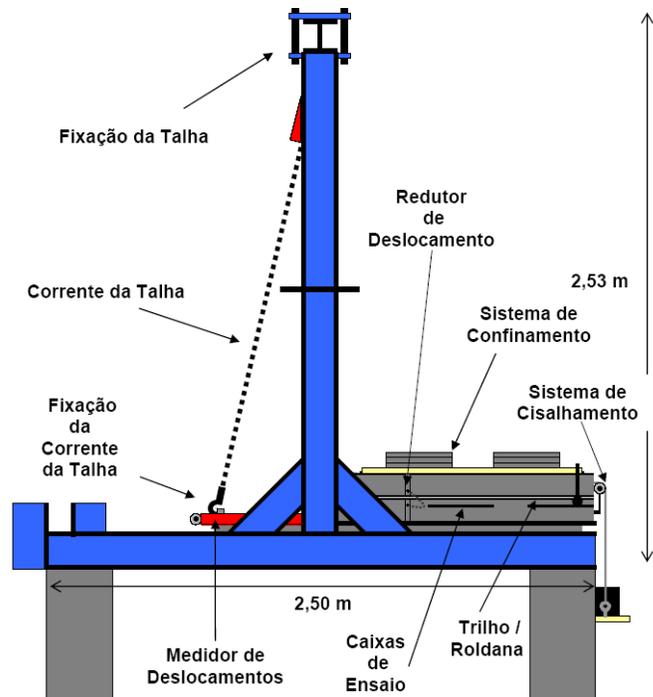


Figura 31 - Configuração para ensaios de Cisalhamento Direto e Inclinado (Aguiar, 2008)

3.5. Metodologia de Ensaio

3.5.1. Ensaio de Rampa

O procedimento do ensaio de rampa é simples, inicialmente inclina-se a rampa através de uma talha que movimenta a base metálica, esta base é livre em uma das extremidades e rotulada na outra. O conjunto é inclinado gradualmente e os ângulos são monitorados por um medidor de base magnética com resolução de $0,5^\circ$. A caixa superior desliza sobre roldanas que correm sobre os trilhos de 2 cm de altura. Os deslocamentos da caixa são medidos nas duas extremidades (direita e esquerda), através de dispositivos extensométricos do tipo *tell-tale*, até que haja a ruptura da interface (Figura 32).



Figura 32 - Ensaio de rampa após a ruptura

3.5.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

O procedimento do ensaio de cisalhamento direto é similar ao cisalhamento direto convencional para pequenas dimensões. Ambos se baseiam diretamente no critério de Coulomb. Aplica-se uma força axial, em seguida exerce-se uma força tangencial na caixa superior que a desloca, com velocidade constante, até que ocorra a ruptura. O plano de ruptura é necessariamente na horizontal e entre as duas caixas de cisalhamento. Durante os ensaios tem-se a força normal ao plano

de ruptura, mede-se a força cisalhante exercida na caixa superior e o seu deslocamento médio em relação à caixa inferior.

3.5.3. Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

O procedimento do ensaio de cisalhamento inclinado também é relativamente simples. Com a talha, inclina-se o conjunto de caixas até o ângulo pré-determinado, o qual é medido com o auxílio do medidor de base magnética, fixado na caixa superior. Mesmo com o grampo prendendo as duas caixas, monitoram-se possíveis deslocamentos da caixa superior em relação a inferior até que atinja o ângulo de rampa desejado. Assim, a tensão cisalhante é exercida através dos pesos sobre a plataforma de aplicação de cargas. Para cada peso aplicado, liam-se os deslocamentos da caixa até se verificar a ruptura da interface.

A Figura 33 mostra a inclinação da plataforma para o ensaio de cisalhamento direto inclinado. Observa-se o grampo tipo C impedindo o movimento da caixa superior, durante a inclinação.



Figura 33 - Plataforma durante o ensaio de cisalhamento direto inclinado

3.6. Programa de Ensaio

A Tabela 13 apresenta todos os ensaios realizados, totalizando 39 ensaios. Esta campanha procurou avaliar a influência do tipo de solo, do tipo de

geossintético na interface e comparar os resultados obtidos em cada um dos três diferentes ensaios.

A convenção da simbologia para identificar os ensaios e interfaces foi baseada em Aguiar (2003), Rezende (2005) e Aguiar (2008). A brita será identificada pela sigla BR. As siglas dos geossintéticos são GG, para as geogrelhas e GM para geomembranas. Para os ensaios considerou-se as seguintes abreviaturas: ensaio de rampa, RP; ensaio de cisalhamento direto convencional, CC; ensaio de cisalhamento direto inclinado a 4,5°, CI-4,5; cisalhamento direto inclinado a 9,0°, CI-9,0 e cisalhamento direto inclinado a 18,0°, CI-18,0.

Tabela 13 - Programa de ensaios

Tipo de Ensaio	Interface	Simbologia	Nº de Ensaios	σ_c (kPa)			
RP	Brita	Brita	BR-BR	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geogrelha	BR-GG	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geomembrana	BR-GM	3	1,0	1,7	2,4
CC	Brita	Brita	BR-BR	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geogrelha	BR-GG	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geomembrana	BR-GM	3	1,0	1,7	2,4
CI-4,5	Brita	Brita	BR-BR	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geomembrana	BR-GM	3	1,0	1,7	2,4
CI-9,0	Brita	Brita	BR-BR	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geogrelha	BR-GG	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geomembrana	BR-GM	3	1,0	1,7	2,4
CI-18,0	Brita	Brita	BR-BR	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geogrelha	BR-GG	3	1,0	1,7	2,4
Total de ensaios				39			