

3 Programa Experimental

3.1. Materiais Utilizados

3.1.1. Solo

Para essa pesquisa utilizou-se um solo maduro, coluvionar, argilo-arenoso, (Soares, 2005 apud Ramirez, 2012), que foi coletado do Campo Experimental II, localizado no campus da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. O solo foi retirado de uma profundidade que varia entre 0 e 1 metro.



Figura 3.1 - Localização do Campo Experimental II PUC-Rio.

Este solo possui características de tonalidade vermelha amarelada, textura micro-granular e aspecto homogêneo, sendo constituído basicamente por quartzo, granada alterada, argilominerais (essencialmente caulinita) e óxidos de ferro e alumínio, como produto do intemperismo dos minerais primários da biotita gnaise (Soares, 2005 apud Ramirez, 2012). A Figura 3.2. apresenta uma foto do solo coluvionar utilizado.

O solo estudado foi removido do campo experimental manualmente tendo sido utilizados pá, enxada e um carrinho de mão. O material foi retirado em um dia seco em que o solo não apresentava alta umidade, facilitando assim a remoção e o transporte. Aproximadamente 80 kg deste material foi levado ao Laboratório de Geotecnia e então, colocado em partes numa estufa a 60 °C, pelo período de 24 horas. Após esse período podia-se perceber que o solo atinge uma umidade constante e baixa, inferior a 1%. O material então era acomodado em sacolas plásticas lacradas e guardadas em uma câmara úmida localizada no laboratório, garantindo assim seu isolamento com a umidade externa.

O solo utilizado neste trabalho já foi amplamente estudo por outros pesquisadores na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (Sertã, 1986; Marinho, 1986; Lins, 1991; Dylac, 1994; Beneveli, 2002; Soares, 2005, Ramirez 2012, Quispe 2013). Tal fato, bem como a proximidade do campo experimental com o laboratório de geotecnia da PUC-RIO, fazem deste um material muito conveniente a ser estudado, razão pela qual foi escolhido para essa pesquisa. Sertã (1986) fez um estudo dos aspectos geológicos e geotécnicos deste material, contribuindo com um amplo conhecimento sobre suas características. Marinho (1986), Lins (1991), Daylac (1994), Beneveli (2002) e Soares (2005) fizeram uso deste material em ensaios especiais e para testar equipamentos desenvolvidos na PUC-Rio.



Figura 3.2 – Argila utilizada - solo argiloso coluvionar.

Dylac (1994) elaborou um perfil morfológico que está apresentado na Figura 3.3.. Durante o processo de peneiramento foi observada a presença de grãos de quartzo bem como a de matéria orgânica.

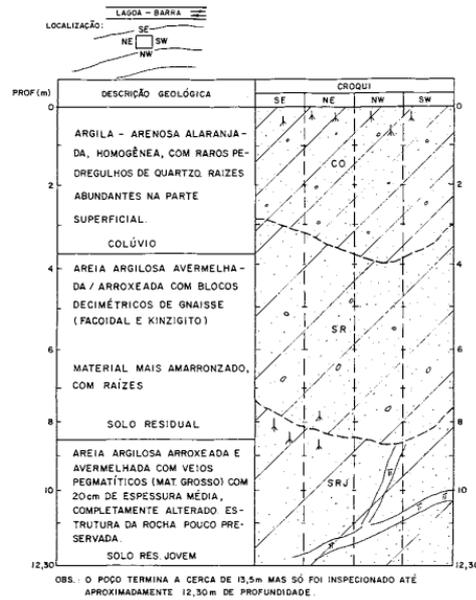


Figura 3.3 - Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II (Dylac, 1994)

Dylac (1994) também elaborou a tabela 3.1 na qual resume uma análise mineralógica realizada anteriormente por Sertã (1986). A análise feita por Sertã no campo experimental II da PUC ocorreu entre a profundidade de 3,00 m a 3,50 m. Foi notada a presença predominante de alguns minerais como a caulinita, a gibsita e a goetita.

Tabela 3.1 - Análise mineralógica (Sertã, 1986)

Fração do solo	Mineral	Quantidade / Observações
Pedregulho	Quartzo	Grãos arestados de coloração transparente a leitosos
	Granada alterada	Alguns fragmentos
Areia	Quartzo	Grão arestados
	Granada muito alterada	Correspondem a aproximadamente 5% da amostra total
	Agregados Ferruginosos	
	Magnetita	pequenos traços
Silte	Quartzo	presença
	Caulinita	presença
	Goetita	presença
Argila	Caulinita	presença marcante
	Goetita	alguns traços

3.1.2. Fibras de Coco

As fibras de coco utilizadas nessa pesquisa são provenientes de uma parceria entre a Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) e a Secretaria de Conservação e Serviços Públicos (SECONSERVA), que realizam a segregação, coleta e a entrega à ECOFIBRA, empresa responsável pelo beneficiamento da casca do coco verde.

Um fardo com cerca de 1m^3 de fibra de coco seca, soltas e com comprimentos que variavam entre 8cm e 25cm aproximadamente, que pode ser visto na figura 3.4, foi dividido em diversas bolas e guardado no laboratório. As fibras portanto vieram prontas para o uso, sendo necessário apenas corta-las no tamanho desejado.



Figura 3.4 – Fardo de fibra de coco verde beneficiada pela empresa EcoFibra

Para esse pesquisa, optou-se por ensaiar um pó de fibra moída, bem como a fibra cortada com comprimento aproximado de 2cm. A moagem da fibra se deu com uso do moedor manual da marca Botini, que pode ser visto na figura 3.5



Figura 3.5 – Moedor de grãos Botini

Já as fibras com comprimento de 2cm foram cortadas com auxílio de uma tesoura e de um gabarito que auxiliou a realização do corte no comprimento correto.

Devido a natureza da fibra de coco, não se pode garantir um comprimento exato para todas as fibras, havendo uma variação de cerca de 2mm para mais ou para menos em seu comprimento.

Amostras das fibras cortada e moída, usadas para a elaboração das misturas, podem ser vistas nas figuras 3.6 (a) e 3.6 (b).



Figura 3.6 – fibra de coco verde cortada utilizada nos corpos-de-prova – (a) cortada; (b) moída.

3.1.3. Água

A água utilizada na preparação dos corpos de prova (solo puro e misturas) para os ensaios triaxiais e ensaios de compactação com o solo argiloso coluvionar foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

3.1.4. Misturas Solo-Fibra de Coco

O solo foi preparado como consta no item 3.1.1 e a fibra, como no item 3.1.2. As misturas foram calculadas com respeito à massa total do solo seco. As misturas foram feitas primeiramente para o ensaio de compactação, no qual se deseja descobrir a umidade ótima de cada mistura. Para a mistura destinada ao ensaio de compactação, sabe-se a priori que a umidade do solo utilizado, seco na estufa a 60 °C e armazenado na câmara úmida, é inferior a 1%. Inicialmente, espalha-se uma massa conhecida de solo em bandeja metálica de grande dimensão e então, adiciona-se uma quantidade de água correspondente a 20%. É necessário que o solo contenha pelo menos esse valor de umidade, pois do contrário, torna-se inviável realizar a mistura do solo com as fibras, uma vez que elas tendem a ser aglutinar em tufos quando misturadas ao solo seco.

Sabe-se também que a umidade de 20% é bem inferior a umidade ótima, garantindo assim que o primeiro ponto ensaiado esteja no ramo seco da curva da curva de compactação. Após adicionada esta quantidade de umidade, a fibra de coco é introduzida gradativamente na mistura, na quantidade correta em peso, para que se obtenha o teor de fibra desejado. Esse processo deve ser realizado com cuidado e a medida que a fibra vai sendo adicionada, a mistura deve ser remexida afim de se evitar que haja concentrações distintas de fibra em diferentes pontos. A figura 3.7 mostra o procedimento de mistura do solo e da fibra cortada.



Figura 3.7 – Processo de mistura do solo e da fibra

Embora as fibras sejam dispersas de forma aleatória, isto é, não existe uma orientação preferencial do reforço, e que de fato se deseja que os corpos-de-prova possuam esta configuração, a natureza do processo compactação ao qual a mistura é submetida, induz uma tendência das fibras de se orientarem horizontalmente (Diambra, 2010).

O primeiro ponto da curva de compactação é então realizado com essa mistura e após isso, uma certa quantidade de água é adicionada a mistura para que o próximo ponto possa ser executado. Uma vez conhecida a umidade ótima, através da curva de compactação, esta é utilizada para confeccionar a mistura utilizada para os corpos de prova a serem usados nos ensaios triaxiais. O procedimento é similar ao de um único ponto da curva de compactação, com a diferença de que desta vez o teor de umidade utilizado deve ser o igual ao da umidade ótima e, portanto, a umidade inicial do solo deve ser levada em consideração, mesmo sendo ela um valor muito baixo. A diferença entre a umidade inicial do solo é calculada através de 3 pequenas amostras introduzidas em um estufa a 110 °C, temperatura suficiente para se remover toda a umidade do solo. As amostras são pesadas antes e depois de serem introduzidas na estufa, e a

diferença de peso corresponde a umidade perdida em cada amostra. A média desse valor é assumida como a umidade presente no solo utilizado na elaboração das amostra do corpo de prova. Ao solo com a umidade inicial determinada, é acrescida uma quantidade de água para este chegue ao valor da umidade ótima, e uma vez que está umidade se torna constante em toda a massa de solo devido ao processo manual de mistura, uma certa quantidade de fibra de coco, cuja quantidade é calculada em relação a massa seca de solo presente, é adicionada. Garante-se assim uma mistura na umidade ótima e com o teor de fibra que se deseja avaliar.

As misturas ensaiadas nessa dissertação foram feitas com a fibra moída em um moedor da marca Botini, exibido na figura 3.5, sendo este tipo de fibra ensaiado nos teores de 0,5% e 1%. As fibras cortadas foram ensaiada nos teores 0,5%, 0,75%, 1%, 1,25% e 1,5%.

3.2. Quantidade e Cronograma de ensaios

Este trabalho apresentou dois tipos de ensaio. Os ensaios de compactação, cujo objetivo era descobrir a umidade ótima de cada mistura ensaiada. Esse teor de umidade então conhecido foi adotado nos ensaios triaxiais drenados realizados na sequencia.

Os ensaios realizados foram feitos com misturas elaboradas com os diferentes teores de fibras, sendo elas cortadas ou moídas. Cada combinação de teor e comprimento teve 1 ensaio de compactação e 3 ensaios triaxiais, respectivamente com tensões confinantes de 50kPa, 150kPa e 300kPa, como será detalhado mais a frente.

Foram ensaiados 7 diferentes teores de mistura solo-fibra, sendo 2 teores com a fibra moída e os outros 5 teores, ensaiados com a fibra cortada com o comprimento de 2cm. Também foram executados ensaios com o solo puro.

Ao todo, foram realizados por tanto, **8 ensaios de compactação e 24 ensaios triaxiais**. Optou-se por não usar nenhum tipo de nomenclatura para designar os diferentes teores ensaiados. O solo puro será mencionado daqui para frente simplesmente como solo puro. As misturas serão precedidas pelos nomes “cortada” ou “moída”.

Assim, as 7 diferentes misturas ensaiadas e o solo puro serão expressados como:

- Solo puro
- Fibra Moída 0,5%
- Fibra Moída 1,0%
- Fibra Cortada 0,5%
- Fibra Cortada 0,75%
- Fibra Cortada 1,0%
- Fibra Cortada 1,25%
- Fibra Cortada 1,5%

3.3. Quantidade e Cronograma de ensaios

Este tópico irá descrever a metodologia utilizada para realizar os ensaios mecânicos (ensaios de compactação e ensaios triaxiais) no compósito solo-fibra de coco, cujo objetivo é revelar um pouco das propriedades mecânicas deste material. Resultados de ensaios de caracterização física do solo utilizado, obtido por outros pesquisadores, serão citados junto com o resultado dos ensaios mecânicos no capítulo

3.3.1. Equipamento Utilizado

Todos os ensaios desta pesquisa foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. A prensa utilizada é da marca Wykeham-Ferrance, de velocidade de deslocamento controlada, com capacidade de 10 toneladas. O ajuste das velocidades de deslocamento do pistão é determinado mediante a seleção adequada de pares de engrenagens e a respectiva marcha.

A câmara triaxial empregada é própria para corpos de prova com diâmetro de 1,5". A câmara possui um corpo de acrílico que suporta uma pressão confinante máxima de 1000 kPa.

A célula de carga utilizada é do fabricante ELE International Ltda., com capacidade máxima de 5000 kN e precisão de 0,1 kN. Para a obtenção dos deslocamentos foram utilizados LVDT's da marca Wykwham Farrance, com cursos de 25 mm e resolução de precisão de 0,01 mm. O transdutores usado na medida das pressões na câmara, no medidor de variação de volume e das poropressões são da marca Schaevitz, com variações de $\pm 2,0$ kPa e capacidade máxima de 1700 kPa.

As variações de volume são obtidas através de medidores de variação volumétrica (MVV), fabricados na PUC-Rio, segundo o modelo do Imperial College. Todas as partes do equipamento são apresentadas na Figura 3.8.

Para a gravação dos dados, obtidos por intermédio do transdutor, foi utilizado o sistema de aquisição de dados composto pelo hardware QuantumX de oito canais da empresa alemã HBM e pelo software CatmanEasy (Figura 3.9).

Com todo este equipamento, o hardware e software utilizado se conseguiram realizar e monitorar em tempo real todas as etapas do ensaio.

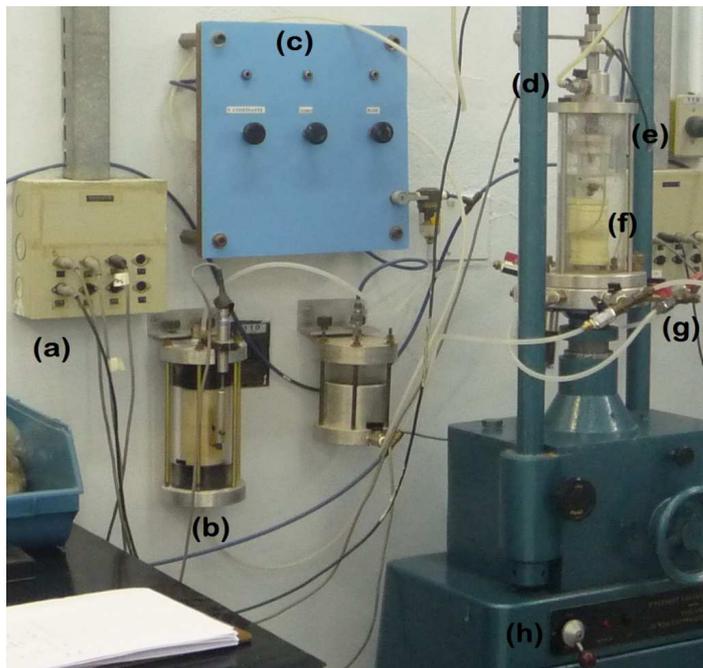


Figura 3.8 - (a) Caixa leitora de dados ; (b) Medidor de Variação de Volume tipo Imperial College; (c) Painel de controle das Pressões; (d) Pressão confinante; (e) Cilindro de Acrílico; (f) Corpo-de-prova; (g) Válvulas da prensa Triaxial; (h) Controle para início do cisalhamento



Figura 3.9 – Software CatmanEasy na etapa de cisalhamento

3.3.2. Preparação dos Corpos-de-Prova

Para a confecção dos corpos de prova do solo argiloso puro e as misturas solo-fibra, inicialmente compactou-se um corpo cilíndrico, na energia Proctor Normal, utilizando a umidade ótima e massa específica seca máxima obtida para cada tipo de mistura e o solo puro. Uma explicação mais detalhada deste processo pode ser encontrada no apêndice deste trabalho. Obtido o material compactado (Figura 3.10), este é dividido em 3 partes cuja as extremidades são fatias com um arco aproximado de 120° (Figura 3.11). Molda-se cada uma das 3 partes com dimensões de 78.2 mm de altura e 38.0 mm de diâmetro em um aparelho de fabricação própria do laboratório (Figura 3.12). Trata-se de um suporte metálico com base giratória, similar a um torno e com duas hastas metálicas que tem a função de gabarito. O corpo-de-prova para o ensaio triaxial é obtido com o auxílio de uma régua metálica que desliza na superfície do gabarito enquanto a base giratória é rotacionada, produzindo assim uma amostra com o diâmetro mencionado. Assim, cada corpo-de-prova compactado garante 3 amostras para o ensaio triaxial, sendo cada uma delas ensaiadas com diferentes tensões efetivas.



Figura 3.10 - Corpo cilíndrico compactado



(a)



(b)

Figura 3.11 – Corpo cilíndrico compactado sendo dividido em 3 partes; (a) com fibra moída; (b) com fibra cortada



(a) (b) (c)
Figura 3.12 – (a) Corpo de prova sendo moldado lateralmente moldagem; (b) Corpo de prova com a lateral moldada (c) Corpo de prova finalizado com a altura certa para o ensaio

No momento da elaboração dessas amostras, retiram-se 3 cápsulas com o solo (Figura 3.13), que são pesadas e posteriormente deixadas na estufa de 110°C por 24h afim de se conhecer sua umidade inicial.



Figura 3.13 – Capsulas com mistura de solo-fibra tirados do moldagem

Antes de fazer a montagem do ensaio triaxial testa-se a membrana (com ajuda de um molde de aço) para ter a certeza que esta não esteja furada e possa comprometer o ensaio (Figura 3.14), pesar o corpo de prova para ter seu peso inicial e verificar o correto funcionamento de cada válvula do equipamento triaxial (Figuras 3.15)



Figura 3.14 – Teste de membrana



(a)



(b)

Figura 3.15 – (a) Pesagem do corpo-de-prova para montar na prensa triaxial; (b) Verificação da prensa antes do ensaio

No momento da montagem, deve-se colocar um papel filtro na base do equipamento triaxial, posicionado sobre uma pedra porosa que apresenta rigidez e alta permeabilidade. A função do papel filtro é de impedir que pequenos grãos de solo possam penetrar na estrutura porosa da pedra e assim comprometer sua permeabilidade (Figura 3.16). Em seguida coloca-se o corpo de prova cuidadosamente sobre a base do equipamento e, com a ajuda de um molde de aço, o veste com a membrana (Figura 3.17).



Figura 3.16 – Colocação do papel filtro.



(a)

(b)

Figura 3.17 – (a) Colocação do corpo-de-prova no equipamento triaxial; (b) Colocação da membrana com ajuda do molde de aço.

Uma vez que corpo de prova esteja fixo junto com a membrana, coloca-se mais um papel filtro e uma pedra porosa no topo do corpo de prova nessa ordem (Figura 3.18).



Figura 3.18 – Colocação do papel filtro e a pedra porosa no topo do corpo-de-prova

Para finalizar coloca-se sobre a pedra porosa o *cap*, uma estrutura de acrílico, rígida e com um orifício pelo qual flui a água que entra ou sai da amostra durante o ensaio. A membrana é então presa com 4 o-rings à base do aparelho e ao *cap* sendo 2 o-rings presos à base e outros 2 presos ao *cap*. Desta forma, garante-se o total isolamento do corpo-de-prova com a água usada para se aplicar a tensão confinante.

Depois, a câmara triaxial é fechada e o corpo-de-prova é submerso em água. A câmara triaxial não fica totalmente preenchida com água, na verdade cerca de 10% do volume é preenchido com ar. Na parte superior da câmara existe a conexão com um tubo ligado a uma máquina de ar comprimido que é responsável por criar a tensão de confinamento dentro da câmara. Uma válvula localizada junto a parede controla a magnitude da pressão aplicada (Figura 3.19).



Figura 3.19 – (a) Fixação da membrana ao corpo de prova com os o-rings; (b) Preenchimento da câmara triaxial com água; (c) Colocação da conexão de pressão confinante.