

### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental tem como objetivo principal investigar e identificar o efeito da adição de fibras de coco nas propriedades mecânicas de resistência de um solo arenoso, desenvolvendo um programa por etapas, descrito a seguir.

A primeira etapa descreve as propriedades físicas e de caracterização dos materiais utilizados na pesquisa. Na segunda etapa será descrito o método utilizado na preparação dos corpos de prova para os ensaios triaxiais. Na terceira etapa são descritos detalhadamente, os métodos e procedimentos que são necessárias para a execução dos ensaios programados, além de mostrar os equipamentos que serão utilizados no laboratório. Os ensaios de resistência mecânica ao cisalhamento deste programa experimental foram executados nos equipamentos triaxiais do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC- Rio.

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS**

Nos seguintes itens são apresentadas as propriedades físicas e químicas dos materiais utilizados na presente pesquisa, com ênfase naqueles aspectos que são de interesse direto para o desenvolvimento e melhor entendimento deste trabalho.

##### **3.1.1 Areia**

Os ensaios de caracterização física da areia foram realizados conforme os seguintes métodos e procedimentos:

- Ensaios de granulometria (NBR 7181 - ABNT, 1984-e);
- Massa específica real dos grãos (NBR 6508 - ABNT, 1984-c);
- Índices de vazios, mínimo e máximo (NBR 12051 – ABNT, 1991-b; NBR 12004 – ABNT, 1990).

Para definir o estado da areia é preciso comparar o índice de vazios da areia com seus limites, assim, pode-se definir a Densidade Relativa como:

$$C_R = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (3.1)$$

De acordo a este resultado e por sugestões de Terzaghi as areias podem ser classificadas segundo sua  $C_R$  como areias fofas ( $C_R < 0,33$ ), de compactade media ( $C_R$  0,33 a 0,66) e compactas ( $C_R > 0,66$ ).

As amostras de areia utilizadas nesta pesquisa, depois de adquiridas, foram acondicionadas em sacos plásticos de 50 kg de capacidade e guardadas no depósito do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC- Rio. A areia é proveniente da jazida de Areal da divisa, do bairro de Santa Cruz do estado Rio de Janeiro - Brasil. De acordo com a NBR 7181 - ABNT (1984) o material foi classificado como uma areia média bem graduada (SW) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS).

O solo arenoso tem uma textura micro-granular, constituído por quartzo, granito alterado e minerais de argila (principalmente a caulinita) e não foi observada a presença de matéria orgânica.

### 3.1.2 Fibras de coco

As fibras de coco utilizadas nesta 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 empresa ECOFIBRA, a responsável pelo beneficiamento da casca do coco verde.

Para a preparação das misturas, as fibras foram cortadas em comprimentos de 25 e 50 mm aproximadamente, o que diminui o emaranhamento entre elas e foram distribuídas de forma aleatória na areia, como é apresentado na figura 5 e 6.



**Figura 5:** Cortes da fibra de coco, (a) comprimento 50 mm, (b) 25 mm.

É importante ressaltar que os diâmetros das fibras são variáveis por serem um material natural. Na tabela 8 é apresentado um resumo das propriedades mecânicas das fibras de coco, citadas anteriormente no item 2.2.2 (propriedades mecânicas das fibras de coco).

**Tabela 8:** Resumo das propriedades mecânicas das fibras de coco (Tomczak, 2010).

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Fibra de coco</b>
Densidade Relativa	1,15
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,0 - 6,0
Resistência à tração última (MPa)	37,53 – 250
Deformação axial na ruptura (%)	10,0 - 51,4

### 3.1.3 Água

A água utilizada na preparação dos corpos de prova (areia pura e misturas) e na operação do equipamento para os ensaios triaxiais é destilada, processada no mesmo laboratório de Geotecnia da PUC- Rio.

### 3.1.4 Sílica Coloidal

A Sílica Coloidal conhecida também em alguns trabalhos como micro-sílica da marca LUDOX, é uma solução aquosa com dispersão de partículas de sílica muito pequenas de tamanho expressado em nanômetros. Oferecem-se diferentes graus de concentração, tendo uma ampla flexibilidade, dependendo dos objetivos de desempenho específicos. As partículas são esféricas, não porosas e dispersas na água, tem um núcleo de sílica densa e uma superfície recoberta por grupos de Silanol (Si- OH). O aspecto da Sílica Coloidal é líquida, não é considerada uma substância perigosa. Na tabela 9 apresentam-se algumas propriedades disponíveis do composto químico, fornecidas pelo distribuidor Sigma Aldrich.

**Tabela 9:** Resumo das propriedades físicas da Sílica Coloidal (fornecedor).

Propriedade	Valor
Formulação Química	SiO <sub>2</sub>
Descrição	Coloidal
Concentração	30 wt. % em suspensão em H <sub>2</sub> O
Área de Superfície	198 - 250 m <sup>2</sup> /g
PH	8,6 - 9,3
Densidade	1,21 g/mL a 25° C

A finalidade do uso da sílica coloidal é reduzir os possíveis ataques químicos e alcalinos que possam acontecer nas fibras de coco, criando uma zona de baixo pH ao redor das fibras, reduzindo o transporte dos produtos de cálcio para as fibras naturais.

## 3.2 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

O presente tópico tem como objetivo mostrar os métodos de preparação dos materiais e das misturas para poder realizar os ensaios que serão apresentados mais adiante neste capítulo.

### 3.2.1 Preparação das misturas para ensaiar

Para a preparação das misturas, foi necessário realizar a secagem ao ar do solo arenoso, acondicionando-o em sacos plásticos hermeticamente fechados. Para as fibras de coco foi necessário selecionar o comprimento correto, e pesar a quantidade necessária de acordo com o teor de fibra requerida em cada mistura. As misturas foram preparadas inicialmente para os ensaios de caracterização (curva granulométrica, índice de vazios máximo e mínimo e densidade relativa dos grãos), e posteriormente para a elaboração dos corpos de prova necessários para os ensaios triaxiais.

Para a preparação dos corpos de prova para os ensaios triaxiais, inicialmente pesa-se e coloca-se a quantidade requerida de areia em uma bandeja, adiciona-se o teor de fibra de coco (segundo seu comprimento) e coloca-se o volume de água correspondente a 10% do peso seco do solo (ver figura 6).



**Figura 6:** Processo de mistura solo - fibra.

Para esta dissertação foram preparados sete tipos de misturas como apresentado na tabela 10, onde se variou os teores, e os comprimentos das fibras de coco, nestas misturas inclui-se a mistura com as fibras de coco impermeabilizada com Sílica Coloidal, mistura que foi feita com a mistura que deu os melhores resultados. A variação do teor de fibra foi feita em relação ao peso seco do solo. Esses teores foram determinados com o intuito de estabelecer-se uma melhoria máxima com o maior volume de fibra, já que um dos objetivos do uso desta fibra como reforço é dar uma destinação ambientalmente correta para a maior quantidade possível. Foram realizados um total de 24 ensaios.

**Tabela 10:** Descrição das misturas avaliadas.

Material/ Mistura	Areia Pura (%)	Fibra de coco (%)	Símbolo
Areia Pura	100	0	A0C0
Areia com 0,25% de fibra de 25 mm	99,75	0,25	A025C25
Areia com 0,25% de fibra de 50 mm	99,75	0,25	A025C50
Areia com 0,50% de fibra de 25 mm	99,50	0,50	A050C25
Areia com 0,50% de fibra de 50 mm	99,50	0,50	A050C50
Areia com 0,75% de fibra de 25 mm	99,25	0,75	A075C25
Areia com 0,75% de fibra de 50 mm	99,25	0,75	A075C50
Areia com 0,50% de fibra de 50 mm (impermeabilizada)	99,50	0,50	IA050C50

O símbolo está dividido em três grupos, no primeiro grupo a letra A representa o tipo de solo (areia) e se a mistura fosse impermeabilizada aumenta-se a I (impermeabilização), no segundo grupo representa o teor de fibra, para 0,25% de fibra utiliza-se 025, e o terceiro grupo representa o comprimento da fibra utilizada para 25 mm de fibra se escreve C25.

### 3.2.2

#### Preparação das Fibras de Coco Impermeabilizadas

Para a aplicação da impermeabilização nas fibras foi realizado o tratamento recomendado com a sílica coloidal passando as fibras pelo vácuo com o fim de garantir a impermeabilização em toda a fibra, a figura 7 descreve o procedimento completo.

		
<p>1. As fibras foram pesadas, com o objetivo de controlar se o peso da fibra vai ter variação após a impermeabilização.</p>	<p>2. A dosagem da Sílica coloidal líquida foi dosada em proporções iguais com água destilada (50/50).</p>	<p>3. As fibras de coco são mergulhadas e misturadas em um agitador magnético na solução por 5 min aproximadamente, com o fim de impregnar bem as fibras.</p>
		
<p>4. A solução e as fibras foram levadas ao vácuo, com o objetivo de tirar todos os vazios de ar, garantindo que as fibras foram totalmente impermeabilizadas.</p>	<p>5. Foi retirada a fibra da solução e foi seca na estufa a 60°C por 1 hora.</p>	<p>6. A fibra impermeabilizada foi pesada percebendo-se que a variação no peso é insignificante. A textura da fibra é a mesma, mostrando um brilho e escurecimento da cor devido à impermeabilização.</p>

**Figura 7:** Processo de impermeabilização da fibra de coco.

### 3.3 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Neste item são apresentados os ensaios e demais procedimentos utilizados durante o programa experimental. Para os ensaios que foram realizados baseando-se em procedimentos propostos em normas técnicas, será feita referência à mesma. Em caso contrário será descrito de forma mais detalhada.

#### 3.3.1 Ensaio Triaxial (CID)

Os ensaios triaxiais realizados neste trabalho são do tipo Consolidado Isotropicamente Drenado (CID). Os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Descreve-se o equipamento, bem como as metodologias empregadas na preparação dos corpos de prova, processo de saturação e cisalhamento.

##### a. Equipamento utilizado

A prensa utilizada é da marca Wykeham-Ferrance, de velocidade de deslocamento controlada, com capacidade de 10 toneladas (figura 8). O ajuste das velocidades de deslocamento do pistão é determinado mediante a seleção adequada de pares de engrenagens e a respectiva marcha.

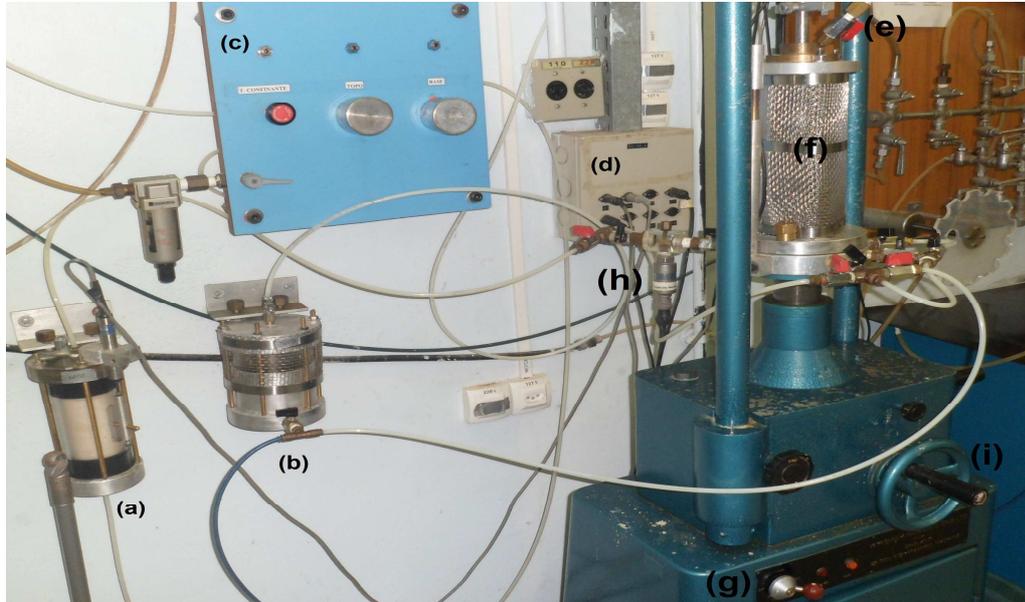
A câmara triaxial empregada é própria para corpos de prova com diâmetro de 3,81 mm. Essa câmara é feita de um material acrílico que suporta uma pressão confinante máxima de 1000 kPa. As tensões efetivas aplicadas serão de 50, 100 e 150 kPa, em todos os casos.

A célula de carga utilizada é do fabricante ELE International Ltd., com capacidade máxima de 5000 kN e exatidão 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 transdutor 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.

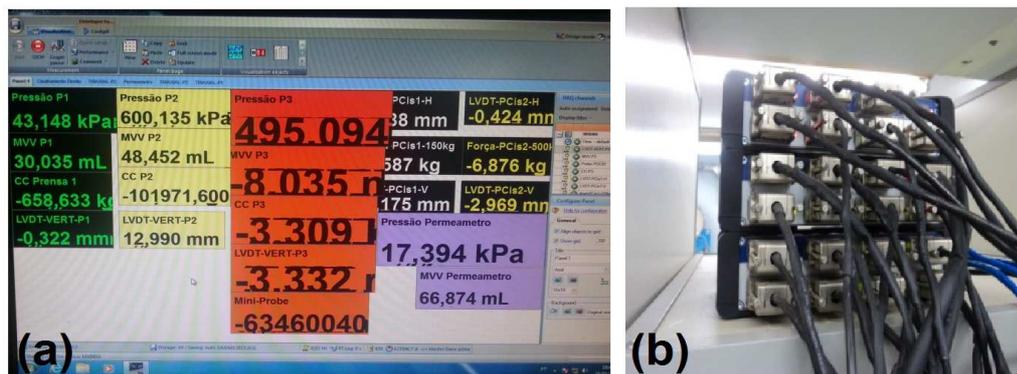
As variações de volume são obtidas através de medidores de variação volumétrica (MVF), fabricados na PUC-Rio, segundo o modelo do Imperial College (Figura 8).

A gravação dos dados, obtidos por intermédio dos transdutores, foi feita utilizando o sistema de aquisição de dados composto pelo hardware QuantumX de oito canais da empresa alemã HBM e pelo software CatmanEasy (figura 9.a).

Com esses equipamentos mencionados foi possível realizar e monitorar, em tempo real, todas as etapas do ensaio.



**Figura 8:** Prensa triaxial da marca Wykeham-Ferrance. (a) Medidor de variação de volume tipo imperial College, (b) Reservatório de água do topo, (c) Painel de controle das pressões, (d) Caixa leitora de dados, (e) Pressão confinante, (f) Cilindro acrílico reforçado, (g) Controle para início do cisalhamento, (h) Transdutor de pressão, e (i) Controle manual de movimento fino do pistão.



**Figura 9:** Equipamento eletrônico do ensaio triaxial (a) Software CatmanEasy; (b) Sistema de aquisição de dados (Ramirez, 2012).

## b. Preparação dos corpos de prova do solo arenoso

A confecção dos corpos de prova da areia pura e das misturas solo-fibra foi feita por compactação diretamente em um molde cilíndrico tripartido. Esta compactação foi

realizada manualmente em cinco camadas. Para a areia pura e as misturas, a umidade é de 10%, valor que permite alcançar uma densidade relativa de 50%, o índice de vazios médio nos CPs varia segundo o teor de fibra. A figura 10 ilustra as etapas da montagem dos corpos de prova.

			
<p>1. É colocada na base do Triaxial uma pedra porosa e o papel filtro, a seguir é colocada a membrana segurando-la com a base por meio dos o-rings.</p>	<p>2. O molde tripartido é colocado sendo as três partes unidas por uma abraçadeira metálica.</p>	<p>3. As juntas são vedadas por uma fita. É vedado também dois dos três furos do tripartido. Os o-rings são colocados na parte superior do molde e a membrana é ajustada por cima.</p>	<p>4. É instalada uma mangueira no furo aberto do tripartido com o objetivo de succionar a membrana às paredes do tripartido, isto para começar a compactar o CP.</p>
			
<p>5. Depois de encher o tripartido com a mistura ou o solo arenoso (compactada em 5 camadas), na parte superior é colocado outro papel filtro e também a pedra porosa.</p>	<p>6. Em seguida é colocado o topo (cap) na parte superior, ajustando-a com a membrana sobrada sobre o tripartido e fixada com os o-rings colocados no passo 3.</p>	<p>7. Todos os elementos que foram utilizados para moldar o CP são desmontados e a membrana é acomodada cobrindo os o-rings da parte superior e inferior.</p>	<p>8. A câmara triaxial é colocada e ocorre o enchimento completo da câmara com água destilada, testando a pressão da linha confinante é conectada à câmara.</p>

**Figura 10:** Montagem do corpo de prova (solo arenoso).

### c. Procedimento de saturação dos corpos de prova

As técnicas de saturação utilizadas para os corpos de prova da areia e suas respectivas misturas foram por percolação e por contrapressão de água através da amostra.

No caso da saturação por percolação, colocamos uma diferença de pressão entre o topo e a base de 5 kPa, e uma diferença entre a pressão confinante e o topo de 10 kPa, permitindo que a água fluía da base para o topo no CP. Na saturação por contrapressão, a pressão confinante aplicada ao corpo de prova excede a contrapressão em 10 kPa (mesma pressão na base e no topo), onde o fluxo de água é permitido pelo topo e base no CP. Para verificar se o grau de saturação era satisfatório, calculava-se o parâmetro B de Skempton, sendo:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \quad (3.1)$$

Onde:

$\Delta u$ : excesso de poropressão gerado,

$\Delta \sigma_c$ : acréscimo de tensão confinante aplicado.

Para todas as amostras avaliadas neste trabalho foram considerados aceitáveis valores de B maiores ou iguais a 0,95. Além de medir o parâmetro B, foi controlada a condutividade hidráulica (permeabilidade) de alguns corpos de prova no estado saturado, com o objetivo de controlar a influência das fibras na permeabilidade dos corpos de prova.

Pode-se calcular a permeabilidade de um solo considerando as equações de Darcy:

$$K = \frac{Q}{i * A} \quad (3.2)$$

$$Q = \frac{V_W}{t} \quad (3.3)$$

$$i = \left( \frac{h_t^{base} - h_t^{topo}}{h^{CP}} \right) \quad (3.4)$$

$$A = \pi * r_o^2 \quad (3.5)$$

Onde:

K: Condutividade hidráulica (m/s)

Q: Vazão (m<sup>3</sup>/s)

i: Gradiente hidráulico (adimensional)

A: Área transversal inicial do corpo de prova (m<sup>2</sup>).

$h_t$ : Pressão na base e no topo do corpo de prova.

$h^{CP}$ : Altura inicial do corpo de prova (m).

$r_o$ : Raio inicial do corpo de prova (m).

#### d. Adensamento e Cálculo do $t_{100}$

Atingida a saturação do corpo de prova, iniciava-se a fase de adensamento isotrópico. O adensamento durava, em média, 3 horas. Nesse tempo, os dados da variação de volume eram coletados. Com estes dados se traçava o gráfico variação volumétrica (ml) versus raiz do tempo. Segundo a recomendação de Head (1986), prolongava-se o trecho retilíneo inicial até encontrar a prolongação horizontal do trecho final. Este último trecho corresponde à estabilização das variações de volume. O ponto de interseção destas duas linhas prolongadas fornecia a raiz de  $t_{100}$  no eixo das abscissas. Logo com o valor de  $t_{100}$  (min) se calculava a velocidade de cisalhamento.

#### e. Cálculo da velocidade de cisalhamento e etapa de cisalhamento no ensaio triaxial

Como os ensaios triaxiais foram drenados, a expressão utilizada para a velocidade de cisalhamento proposta por Head (1986) foi a seguinte equação:

$$v = \frac{\epsilon_f \cdot L}{100 \cdot t_f} \quad (3.6)$$

Onde:

v: velocidade máxima de cisalhamento em mm/min,

L: altura do corpo de prova em mm,

$\epsilon_f$ : deformação axial estimada na ruptura em %,

$t_f$ : tempo mínimo de ruptura em minutos.

O valor de  $t_f$  para este tipo de ensaio triaxial (CID – sem drenagem radial) é de 8,5 vezes o valor de  $t_{100}$ . Contudo, Head (1986) propõe um valor mínimo para  $t_f$  de 120 min.

O objetivo de definir uma velocidade suficientemente lenta para a aplicação da compressão axial é permitir a total drenagem da água do corpo de prova sem gerar excesso de poropressão.

Todos os valores obtidos de  $t_f$  para os corpos de prova deste estudo foram menores que 120 minutos. Portanto, adotou-se  $t_f = 120$  minutos. Assim, definiu-se que a ruptura ocorreria para uma deformação axial de 4,5% e dessa maneira a velocidade máxima (v) calculada foi a mesma para todos os ensaios (0,033 mm/min), sendo a velocidade adotada igual a 0,030 mm/min.

Com a velocidade de cisalhamento definida, o passo seguinte era a colocar um par de engrenagens na prensa, que define a velocidade desejada. Para os cálculos, foi arbitrado 14% de deformação axial como deformação máxima.

Para os ensaios triaxiais, as variantes de tensão  $q$  (tensão de desvio, equação 3,7) e  $p'$  (tensão efetiva média normal, equação 3,8) foram calculados com as formulações do Lambe. Para os parâmetros de resistência dos compósitos utilizaram-se os valores da envoltória de resistência ( $\alpha'$ ) e da coesão ( $a'$ ) obtida no espaço  $p'$  vs.  $q$  para calcular os parâmetros de resistência no espaço Mohr Coulomb ( $\varphi' - c'$ ). As formulações de Lambe e os parâmetros que são apresentados nos gráficos dos resultados definem-se como:

$$q = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \quad (3.7)$$

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \quad (3.8)$$

$$\tan(\alpha') = \text{sen}(\varphi') \quad (3.9)$$

$$\alpha' = c' \cdot \cos(\varphi') \quad (3.10)$$

Onde:

$\alpha'$ : inclinação da envoltória de resistência no espaço  $p':q$ .

$a'$ : intercepto com o eixo  $q$  da envoltória de resistência no espaço  $p':q$ .

$\varphi'$ : inclinação da envoltória de resistência do espaço  $\sigma:\tau$ .

$c'$ : intercepto da envoltória de resistência do espaço  $\sigma:\tau$ .

$\sigma'_1$ : tensão efetiva principal maior.

$\sigma'_3$ : tensão efetiva principal menor.

### 3.3.2 Análise do alongamento e Rupturas das Fibras

Avaliou-se o percentual dos comprimentos finais das fibras submetidos a diferentes tensões, para um melhor entendimento do comportamento solo-fibra e da real atuação e mobilização destas no interior da massa de solo, as características de alongamento e ruptura das fibras foram investigadas após serem solicitadas e submetidas ao ensaio triaxial isotrópico.

Para a obtenção destes resultados procedeu-se da seguinte maneira: tomaram-se três amostras da mistura (A050C50) retiradas do equipamento Triaxial, cisalhadas a diferentes tensões efetivas (50, 100, e 150 kPa), a seguir foram lavadas em uma peneira com água corrente para possibilitar a separação das fibras e da matriz de solo. Depois, as fibras foram secadas ao ar e medidas em porções que apresentavam um mesmo comprimento, com uma

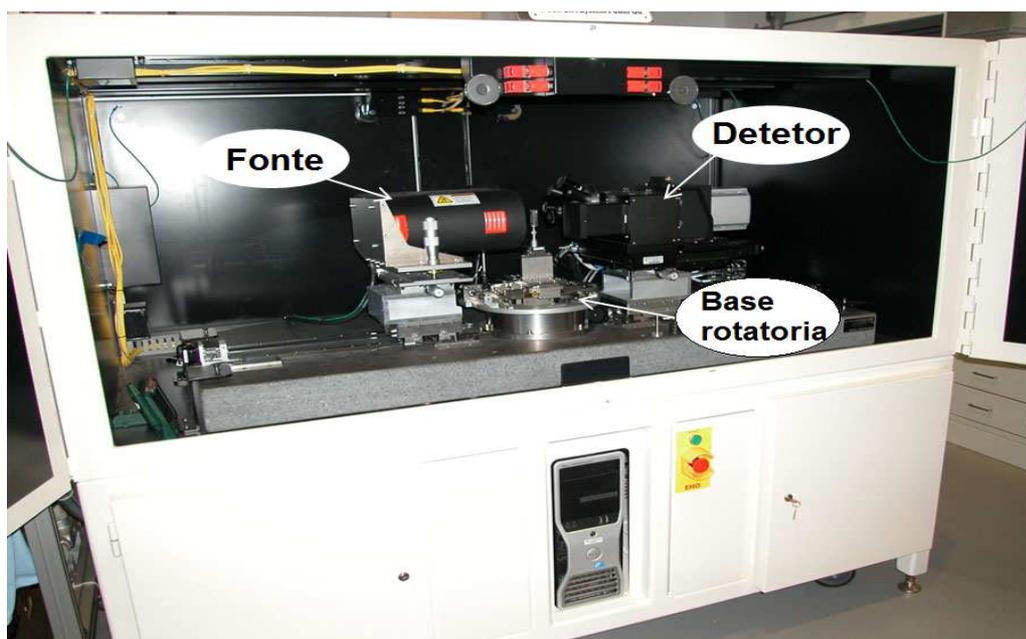
régua comum, em um número de 500 medições para cada amostra (com  $\pm 2,5$  mm de tolerância).

### 3.3.3 Ensaio de Tomografia

O interesse de realizar este ensaio foi avaliar o comportamento e a interação do solo com a fibra no interior de um CP cisalhado a uma tensão efetiva aplicada de 150 kPa na mistura (A075C50), procurando visualizar o arranjo, o sentido e os comprimentos das fibras, além da porosidade e a existência de canais de fluxo geradas no CP após o cisalhamento. O ensaio foi realizado no Laboratório de Microscopia Digital da PUC- Rio.

#### a. Equipamento utilizado

O equipamento utilizado neste estudo é da marca ZEISS, o modelo Xradia 510 Versa 3D (Microscópio de raios – X (XRM)), que analisa os CPs sem destruição, de resolução menor do que 70 nm (tamanho voxel), com capacidade de avaliar amostras com um peso de até 15 kg e dimensões de até 300 mm (figura 11). Este equipamento permite caracterizar exclusivamente a microestruturas de materiais em seus ambientes nativos, assim também como estudar a evolução das propriedades ao longo do tempo, envolvendo-se em uma ampla gama de ambientes de pesquisa (eletrônica, ciências da vida, recursos naturais, pesquisa de materiais).



**Figura 11:** Descrição do equipamento Xradia 510 Versa 3D.

## **b. Procedimento de trabalho**

Para colocar o CP no equipamento Xradia 510 foi preciso segurar a amostra com a base rotatória do equipamento, fixando de tal forma que o CP não sofra movimentos na hora que a base começasse a girar. O ensaio usa uma técnica de dois estágios de ampliação para permitir-lhe atingir exclusivamente a resolução (Raad). Na primeira etapa, ampliam-se as imagens da amostra através de uma ampliação geométrica com micro-CT convencional. Na segunda etapa, um cintilador converte os raios X para luz visível, que é então opticamente ampliada. As imagens são tomadas repetidas vezes e a alta velocidade (produzindo por elemento estudado numerosas imagens, desagregando-as por capas), os elementos do CP vão se representando nas imagens de acordo com a absorção dos raios-x.

## **c. Visualização das imagens (Software)**

ZEISS recomenda a utilização do software “Visual SI Advance” de ORS, um software de análise e visualização avançado de imagens que permite projeta-as em um formato de imagens 3D. Usando técnicas avançadas de visualização e state-of-the-art (renderização de volume), “Visual SI avançada” permite a exploração em alta definição dos detalhes e propriedades dos conjuntos de dados em 3D. É importante aclarar que não é objetivo desta dissertação o uso deste software, mas sim, utilizar as imagens fornecidas deste processo para uma melhor interpretação sobre a disposição, o arranjo, e comprimentos finais das fibras de coco nos corpos de prova após a etapa de cisalhamento.