

USO DE TOMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DE CONDICIONANTES
EM COLUNAS DE BRITA MODELADAS EM CENTRÍFUGA
GEOTÉCNICA

PAOLA MACHADO BARRETO MANHÃES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO-2015

USO DE TOMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DE CONDICIONANTES
EM COLUNAS DE BRITA MODELADAS EM CENTRÍFUGA
GEOTÉCNICA

PAOLA MACHADO BARRETO MANHÃES

“Projeto de dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia”.

Orientador: Professor Fernando Saboya Albuquerque

Co-Orientador: Professor José Tavares Araruna Junior (Departamento de Engenharia Civil/PUC-Rio)

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

68/2015

Manhães, Paola Machado Barreto

Uso de tomografia para avaliação de condicionantes em colunas de brita modeladas em centrífuga geotécnica / Paola Machado Barreto Manhães. – Campos dos Goytacazes, 2015.

xvi, 112 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2015.

Orientador: Fernando Saboya Albuquerque Júnior.

Coorientador: José Tavares Araruna Júnior.

Área de concentração: Geotecnia.

Bibliografia: f. 103-108.

1. COLUNAS DE BRITA 2. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA
3. CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA 4. MODELAGEM FÍSICA I.
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de
Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD 624.15132

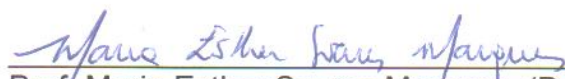
USO DE TOMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DE CONDICIONANTES
EM COLUNAS DE BRITA MODELADAS EM CENTRÍFUGA
GEOTÉCNICA.

PAOLA MACHADO BARRETO MANHÃES

“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.”

Aprovada em 10 de agosto de 2015.

Comissão Examinadora:



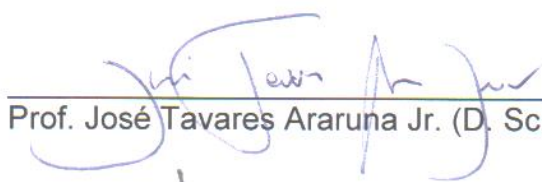
Prof. Maria Esther Soares Marques. (D. Sc.) – IME



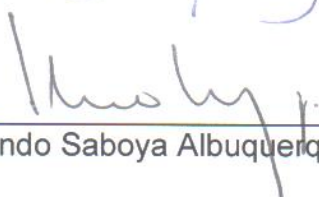
Prof. Sérgio Tibana. (D. Sc.) – UENF



Prof. Paulo César de Almeida Maia. (D. Sc.) – UENF



Prof. José Tavares Araruna Jr. (D. Sc.) – PUC-Rio (co-orientador)



Prof. Fernando Saboya Albuquerque Jr. (D. Sc.) – UENF (orientador)

Dedico esta dissertação à minha família que tanto amo e aos amigos que são como irmãos.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço às forças divinas que prefiro não intitular. Agradeço da mesma forma à minha família por todo apoio nos momentos mais difíceis, por estarem sempre de braços abertos, torcendo pela minha caminhada seguir sempre avante. Amo vocês.

Agradeço também aos amigos Fê, Biru, Alline, Carol JF, Lays, Iara, Lais Brasil, Carolina Sancho, Marcia Giardinieri, Marta Muniz, Cristina Andraus, Pedrão e outros que não citei aqui. Obrigada por serem como anjos da guarda, cada um com sua melhor característica seja ela de dar bronca, afagar, ouvir, falar, ou simplesmente abraçar. Espero poder contribuir tudo que vocês são pra mim!

Ao meu amigo e orientador Fernando Saboya, por ter me dado liberdade para seguir o caminho que meus questionamentos estavam me levando e por ter confiado no rumo que esse trabalho tomou.

Ao José Araruna pela grande contribuição dada a este trabalho e toda disposição e paciência em contribuir para meu crescimento.

À Daniela Marques por ter sido tão aberta a compartilhar conhecimento e ouvir dúvidas, questionamento e angústias acerca do tema que estudamos e pesquisamos e acerca da minha vida pessoal. Agradeço também por termos trabalhado juntas esse tempo em que você esteve no Brasil e por termos continuado a trabalhar juntas mesmo a distância compartilhando informações.

À professora Esther Marques do IME-RJ por contribuir com este trabalho no parecer dado durante a banca de defesa de projeto desta pesquisa. Aos Professores Sérgio Tibana e Paulo Maia por contribuírem também durante a banca de defesa de projeto, além de toda contribuição para meu crescimento como pessoa.

Ao técnico e amigo Milton Pereira por todos os ensinamentos compartilhados durante toda a graduação e mestrado, ao técnico André Manhães por fazer dar certo cada etapa deste trabalho e a Mateus Ladeira, Lucas Otal e Walber por colaborarem nos ensaios em centrífuga.

À Professora Raquel Velloso, chefe do laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, por ter concedido a autorização para que eu pudesse usar as dependências do laboratório, aos técnicos Edson, Carlos, Amaury e Josuel, também do laboratório de Geotecnia da PUC-Rio por terem me auxiliado em todos os momentos que necessitei deles durante minha estada na PUC-Rio com todo bom humor.

Ao Professor Sidnei Paciornik que abriu as portas do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio, além do Haimon Alves e do Marcos Maurício por compartilharem seu conhecimento comigo.

À Fundação CAPES, pelo apoio financeiro para a realização dessa pesquisa.

Sumário

AGRADECIMENTOS	VI
SUMÁRIO	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XIV
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ESCOPO DO TRABALHO.....	3
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS DEPÓSITOS DE SOLOS MOLES.....	4
2.2. COLUNAS GRANULARES	7
2.2.1. <i>Conceito de Célula Unitária</i>	11
2.2.2. <i>Conceito de Comprimento Crítico</i>	12
2.2.3. <i>Métodos Construtivos</i>	13
2.2.4. <i>Condicionantes para o desempenho de Colunas Granulares</i>	17
2.2.4.1. Variação da Seção Efetiva	18
2.2.4.2. Presença da Zona de Amolgamento (<i>Smear Zone</i>).....	18
2.2.4.3. Ruptura	18
2.2.5. <i>Avaliação da integridade em escala real</i>	21
2.3. MODELAGEM FÍSICA	21
2.3.1. <i>Modelagem reduzida</i>	22
2.3.2. <i>Avaliação da integridade em modelos reduzidos</i>	25
2.4. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIO-X.....	28
2.5. CONSIDERAÇÕES	31
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33

3.1. MODELAGEM FÍSICA EM CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA.....	33
3.1.1. <i>Caracterização do modelo.....</i>	33
3.1.2. <i>Materiais.....</i>	34
3.2. TOMOGRAFIA DE RAIO-X.....	50
3.2.1. <i>Processo de Amostragem</i>	50
3.2.2. <i>Tomografia</i>	56
3.2.3. <i>Processamento Digital de imagens.....</i>	60
CAPÍTULO 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	63
4.1. MORFOLOGIA.....	76
4.2. COLMATAÇÃO.....	88
4.3. ESTIMATIVA DA POROSIDADE DA COLUNA GRANULAR	92
4.1. QUANTIFICAÇÃO DO DIÂMETRO E DO CENTROIDE DA COLUNA GRANULAR	97
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES.....	101
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXO I	109

Lista de Figuras

<i>Figura 1: Mapa do Brasil de formação da cobertura sedimentar, em função do período de formação.</i>	
<i>http://www.estudopratico.com.br/estrutura-geologica-do-brasil/.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2: Diferentes técnicas de melhoramento de solos moles</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3: Delimitação da região de equipotencial de carga de pressão próxima a 0 no solo com e sem reforço ...</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4: Perfis ilustrativos do solo mole com e sem reforço</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5: Esquema de célula unitária.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 6: Croqui ilustrativo das características utilizadas na definição de comprimento crítico.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 7: Vibrador utilizado na técnica de vibrosubstituição para a construção de colunas de brita (Keller Brasil, 2014).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8: Etapas construtivas da técnica de melhoramento de solos moles por vibrosubstituição (Keller Brasil, 2014).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 9: Enchimento da caçamba, primeira etapa do processo de construção de colunas de brita pela técnica de vibrosubstituição (Keller Brasil, 2014).</i>	<i>15</i>
<i>Figura 10: Procedimento construtivo de coluna de brita compactada por apiloamento, com o auxílio de bucha de brita como vedação do tubo durante a perfuração.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 11: Tipos de rupturas de colunas granulares.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 12: Ruptura de colunas de borda (adaptada de Hu, 1995)</i>	<i>21</i>
<i>Figura 13: Centrífuga geotécnica de viga (UENF).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 14: Centrífuga geotécnica de tambor (COPPE).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 15: Seções verticais da malha de colunas do teste em centrífuga. Weber et al. (2010)</i>	<i>26</i>
<i>Figura 16: Exumação das colunas de brita de modelo reduzido (adaptada de Ambily et al, 2007).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17: Exumação de colunas de brita de modelos reduzidos de colunas de brita (Hu, 1995).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 18: Espectro eletromagnético.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 19: Sistema de aquisição de projeções. (Adaptado de Alves, 2015).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 20: Dimensões do protótipo.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 21: Container utilizado nos ensaios em Centrífuga Geotécnica.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 22: Container com as adaptações para ensaio.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 23: Aplicação de sobrecarga a 1g</i>	<i>37</i>

<i>Figura 24: Posicionamento dos transdutores de poro-pressão nos compartimentos do container (medidas em mm).</i>	38
<i>Figura 25: Transdutores de poro-pressão inseridos no container.</i>	38
<i>Figura 26: Montagem do container para os ensaios em centrífuga.</i>	40
<i>Figura 27: Ferramentas utilizadas no processo construtivo das colunas</i>	41
<i>Figura 28: Croquis das ferramentas utilizadas no processo construtivo das colunas. Unidades em mm.</i>	42
<i>Figura 29: Curva granulométrica da areia utilizada no aterro e nas camadas drenantes (Adaptado de Cardoso, 2010).</i>	43
<i>Figura 30: Curva granulométrica da areia utilizada na coluna granular.</i>	44
<i>Figura 31: Processo construtivo da coluna granular.</i>	45
<i>Figura 32: Pluviação do material da camada drenante superior e sobrecarga.</i>	46
<i>Figura 33: Pluviador desenvolvido na UENF (adaptada de Cardoso, 2010)</i>	46
<i>Figura 34: Suporte para os LVDTs.</i>	47
<i>Figura 35: Posicionamento dos transdutores de tensão total.</i>	48
<i>Figura 36: Localização da instrumentação em planta.</i>	49
<i>Figura 37: Perfil esquemático do posicionamento da instrumentação</i>	49
<i>Figura 38: Tubo amostrador de PVC de parede fina.</i>	50
<i>Figura 39: União de dois tubos amostradores com fita adesiva</i>	50
<i>Figura 40: Macaco hidráulico posicionado para cravação dos amostradores</i>	51
<i>Figura 41: Sistema idealizado para cravação dos amostradores</i>	51
<i>Figura 42: Guia, prolongadores, conectores e amostradores usados no processo de amostragem</i>	52
<i>Figura 43: Alinhamento das colunas.</i>	53
<i>Figura 44: Vista superior da disposição das colunas no container.</i>	53
<i>Figura 45: Amostradores cravados na matriz argilosa.</i>	53
<i>Figura 46: Prevenção de perda de umidade das amostras com utilização de filme de PVC e elástico.</i>	54
<i>Figura 47: Remoção do amostrador do container.</i>	54
<i>Figura 48: Procedimentos de preparação das amostras para transporte.</i>	55
<i>Figura 49: Tomógrafo de raio-X, modelo Xradia 510 Versa da marca ZEISS.</i>	56
<i>Figura 50: Diagrama de fluxo dos processos que precedem a obtenção dos resultados</i>	57
<i>Figura 51: Base de encaixe no tomógrafo.</i>	58
<i>Figura 52: Peça de encaixe do amostrador na base do tomógrafo</i>	58
<i>Figura 53: Esquema de instalação do amostrador no tomógrafo.</i>	59
<i>Figura 54: Efeito da equalização do histograma (adaptada de Gonzalez e Woods, 2010)</i>	61
<i>Figura 55: imagens das fatias obtidas pela tomografia</i>	63
<i>Figura 56: Layout do software ORS visual</i>	64
<i>Figura 57: Seção transversal sem processamento.</i>	65
<i>Figura 58: Identificação dos materiais.</i>	66
<i>Figura 59: Contaminação dos grãos de areia por material argiloso.</i>	67

<i>Figura 60: Identificação de grão de quartzo com mais fissuras do que os demais.</i>	69
<i>Figura 61: Identificação de grãos com presença de metais</i>	70
<i>Figura 62: Identificação de grãos com composição diferente do quartzo.</i>	71
<i>Figura 63: Elementos presentes nos grãos apresentados na Figura 62.</i>	72
<i>Figura 64: Seções longitudinais da coluna 6 completa.</i>	74
<i>Figura 65: Seções longitudinais da coluna 1 completa</i>	75
<i>Figura 66: Seções transversais.</i>	77
<i>Figura 67: Seções trasnversais.</i>	78
<i>Figura 68: Delimitação da forma da estrutura da coluna 6.</i>	79
<i>Figura 69: Delimitação da forma da estrutura da coluna 1</i>	80
<i>Figura 70: Inclinação da coluna 1</i>	81
<i>Figura 71: Posicionamento das ponteiros das colunas 1 e 6</i>	82
<i>Figura 72: Distinção entre camadas de diferentes granulometrias na coluna 6</i>	84
<i>Figura 73: Distinção entre camadas de diferentes granulometrias na coluna 1</i>	85
<i>Figura 74: Imagens em 3D da amostra coluna 1 - base</i>	86
<i>Figura 75: Imagens em 3D da amostra coluna 6 - base</i>	87
<i>Figura 76: Colmatação próximo à ponteira porosa da coluna 6.</i>	89
<i>Figura 77: Colmatação localizada 2,5 cm abaixo do topo da coluna 6</i>	90
<i>Figura 78: Comparação entre colmatações em regiões com granulometrias distintas (medidas em mm)</i>	91
<i>Figura 79: Procedimento para determinação da ROI delimitada para definir a região com material granular ...</i>	92
<i>Figura 80: Procedimentos para geração da ROI utilizada na quantificação da porosidade</i>	94
<i>Figura 81: Correlação entre valores de condutividade hidráulica em função do diâmetro dos grãos obtidos a partir do valor de porosidade estimado na tomografia da amostra Coluna 1 – Topo.</i>	96
<i>Figura 82: Aproximação da curva da Figura 81 e explicitação do valor encontrado no ensaio de condutividade hidráulica realizado na mesma amostra.</i>	97
<i>Figura 83: Variação do diâmetro com a profundidade das colunas 1 e 6.</i>	98
<i>Figura 84: Variação do centróide na direção x com a profundidade das colunas 1 e 6.</i>	99
<i>Figura 85: Variação do centróide na direção y com a profundidade das colunas 1 e 6.</i>	100

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1: Relação entre tipos de solos, condutividades hidráulicas e grau de condutividade hidráulica (Adaptada de);</i>	7
<i>Tabela 2: Tipos de rupturas, seus condicionantes e características.</i>	20
<i>Tabela 3: Lei de escala em modelagem em centrífuga</i>	24
<i>Tabela 4: Relação das medidas do protótipo e do modelo reduzido</i>	34
<i>Tabela 5: Relação de quantidade de etapas de aquisição e quantidade de seções transversais após a reconstrução referente à cada amostra analisada</i>	60
<i>Tabela 6: Valores limites das regiões de interesse.</i>	73
<i>Tabela 7: Valores de porosidade e índice de vazios da coluna granular de cada amostra ensaiada</i>	95

Lista de Símbolos e Abreviaturas

v_p	Velocidade de percolação
k_p	Condutividade hidráulica
Δh	Perda de carga
T	Fator tempo
c_v	Coeficiente de adensamento
t	Tempo de adensamento
H_d	= E/2- Distância de percolação
d_e	Diâmetro equivalente da célula unitária
L	Comprimento da coluna
l	Espaçamento entre colunas
d	Diâmetro das colunas
D	Diâmetro do pé da coluna
λ	Comprimento de onda
c	Velocidade da luz no vácuo
ν	Frequência de propagação da onda
F	Energia de fóton
h	Constante de Planck
g	Gravidade
ROI	Região de interesse (<i>Region of interest</i>)

Resumo

A avaliação das condições estruturais e geotécnicas de estruturas modeladas em pequena escala é um desafio quando é necessário obter amostras não amolgadas. Reforços de colunas de brita em depósitos de argila mole são um típico exemplo dessa situação. Para esse tipo de caso, a inspeção não intrusiva é de grande importância a fim de se obter informações adicionais que podem ajudar a explicar resultados obtidos da instrumentação realizada no teste.

Neste trabalho é apresentado o uso da tomografia computadorizada como ferramenta para avaliar a qualidade de reforços de colunas de brita modeladas em pequena escala realizada em centrífuga geotécnica após encerrados os ensaios em centrífuga. Os resultados mostram que essa técnica é abundante em detalhes e pode fornecer informações cruciais no espaço tridimensional para auxiliar na interpretação do teste, no ponto de vista de desempenho da coluna como estrutura de fundação e como método para aceleração da drenagem do solo em que foi instalado. Aspectos estruturais e de drenagem da coluna, como ocorrência de variação da seção, segregação dos grãos, colmatações, podem ser identificados e quantificados com essa técnica de avaliação de qualidade das amostras.

Técnicas de amostragem são mostradas e as dificuldades encontradas são discutidas em detalhes, destacando-se a técnica de processamento de imagens para melhorar os recursos visuais.

Palavras-chave: colunas de brita, tomografia computadorizada, centrífuga, modelagem física.

Abstract

Assessment of structural and geotechnical conditions of embedded structures in small scale models is a challenge when undisturbed samples are required. Stone columns reinforcement in soft clay deposit is a typical example of this situation. For this case a non-intrusive inspection is of great importance in order to gather additional information which can help one to explain the obtained results of the test.

Herein, it is presented the use of computed tomography to assess the quality of the stone columns reinforcement in a small scale centrifuge model after the tests. Results have shown that this technique is plenty of details and can provide crucial information in three dimensional space for helping the interpretation of the test regarding structural conditions of the columns, sand grading distribution, clogging, deformation and general aspect that could interfere with the results.

Techniques for sampling are shown and the found difficulties are discussed in details highlighting acquired imaging technique for improving visual features.

Keywords: stone columns, computed tomography, centrifuge, physical modeling.

CAPÍTULO 1.

Introdução

Graças à verticalização dos edifícios comerciais e residenciais nos grandes centros urbanos, a engenharia de fundações especiais tem recebido grande atenção nas últimas décadas, em especial nas regiões litorâneas onde há depósitos de sedimentos dos períodos terciário e quaternário. Por esse motivo, o emprego de técnicas de melhoramento de solos de baixa resistência mecânica e alta compressibilidade muitas vezes torna-se viável diante do baixo custo de aquisição, da importância da localização e da necessidade de grandes áreas de ocupação.

A alta compressibilidade e a baixa resistência mecânica são características dos solos moles. Devido à baixa condutividade hidráulica dos solos moles, é necessário o desprendimento de longo período de tempo de carregamento para que haja o adensamento do solo, além de serem geradas grandes deformações. Muitas técnicas de projeto e desempenho de aterros sobre solos moles são empregadas com a finalidade de controlar os recalques, ou manter a estabilidade do aterro, ou ainda atender essas duas finalidades. (Almeida & Marques, 2010).

Entre os diversos métodos de melhoramento de solos moles, as colunas de brita são utilizadas com o objetivo de melhorarem as propriedades de resistência do maciço de fundação, como também contribuir para a redução dos recalques devido ao adensamento primário, além de acelerar esse processo, com a produção de pouco ou nenhum material para descarte.

Há grande interesse em estudar o comportamento dessas estruturas, em conjunto ou isoladamente, para que se possa entender melhor como ocorrem a interação solos-estrutura, deslocamentos e rupturas. No campo é possível

monitorar e acompanhar a ocorrência desses eventos, direta ou indiretamente, através de instrumentação de campo, que fornecem informações quantitativas de deslocamentos e indicações de ruptura. No entanto, torna-se mais oneroso e não há a possibilidade de exumação para a obtenção de dados qualitativos sobre integridade da estrutura e a precisão no diagnóstico da ocorrência.

Para estudos onde se torna necessário esse nível de informações, é possível utilizar a técnica de modelagem física em escala reduzida. Nesta técnica é possível ter maior conhecimento e controle sobre os materiais envolvidos no processo, a construção do modelo é mais simplificada do que a de um protótipo e a exumação é facilitada pela pequena escala em que se trabalha.

Este trabalho tem como objetivo utilizar tomografia de raio-X para estudar a morfologia e parâmetros de colunas de brita modeladas em centrífuga geotécnica. Dessa forma é possível simular os efeitos do carregamento de solos moles melhorados com a técnica de colunas de brita segundo a teoria da semelhança física e então adquirir informações sobre os condicionantes envolvidos nesse processo.

A identificação dos condicionantes empregando métodos menos invasivos possibilita definições mais realistas de algumas características que podem ser observadas na modelagem reduzida, como por exemplo a distinção da zona de colmatação entre a coluna de brita e o solo mole, diâmetro efetivo de drenagem e ocorrência de rupturas nas colunas, problemas ocorridos devido ao processo construtivo, entre outras características que podem afetar o desempenho da coluna como dreno vertical ou como estrutura de reforço.

1.1. Escopo do Trabalho

O presente trabalho inicia no **Capítulo 1** com o capítulo introdutório, onde são descritas a importância e a justificativa do tema estudado, bem como seus objetivos.

Em seguida, o **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica realizada durante todo o trabalho de pesquisa. Nesse capítulo foram discutidos conceitos importantes acerca de colunas de brita, como também os condicionantes para o desempenho das colunas de brita e métodos de avaliação da integridade dessa construção em escala real.

Ainda no **Capítulo 2** foi abordada a técnica de modelagem física como ferramenta para estudos em escala reduzida, bem como técnicas de avaliação da integridade de colunas granulares modeladas em centrífuga geotécnica e as possíveis aplicações da Tomografia Computadorizada de Raio-X.

No **Capítulo 3** apresentam-se os materiais e métodos utilizados na modelagem física, desde a concepção, como também o processo construtivo do modelo. Ainda nesse capítulo são abordados aspectos referentes às ferramentas utilizadas no processo de amostragem, aquisição das imagens da tomografia e o processamento digital das imagens obtidas.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados obtidos a partir das imagens de tomografia, como características relacionadas com a morfologia da estrutura, colmatações e quantificações de porosidade.

Já no **Capítulo 5** são apresentadas as conclusões deste trabalho acompanhadas de sugestões para a realização de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2.

Revisão Bibliográfica

2.1. Caracterização dos Depósitos de Solos Moles

Os depósitos de solos moles, também chamados de solos coesivos, foram formados em antigas transgressões dos mares e rios. Esses depósitos, que também são chamados de depósitos de planície de inundação por Caruso *et al.* (2001), foram formados por sedimentação lamosa acumulada no leito do rio, por causa de transbordamentos em períodos de cheia durante o período Cenozóico (Terciário).

Como ilustra a Figura 1, existem depósitos do período Cenozóico por todo país. Essas formações geológicas são encontradas em regiões do norte e centro-oeste, além de ser encontradas também por toda costa, como na Zona Oeste do Rio de Janeiro, na região da Baixada Santista localizada no litoral de São Paulo, em Porto Alegre e em Recife (Almeida, 2011; Almeida e Marques, 2010; Soares, 1997; Dominoni, 2011).

Além do conhecimento geológico, é de grande importância para as obras de Engenharia Civil o conhecimento Geotécnico relacionados à esse tipo de formação. Sabe-se que as argilas moles tem baixa capacidade de suporte, por sofrer grandes deformações por um longo período de tempo, quando sobrecarregadas. Segundo Futai (2010), as argilas moles possuem resistência não drenada inferior a 25 kPa ou índice de consistência menor que 0,5, ou ainda N_{SPT} menor que 2. Também é possível encontrar depósitos de solos muito moles, cujo N_{SPT} é zero.

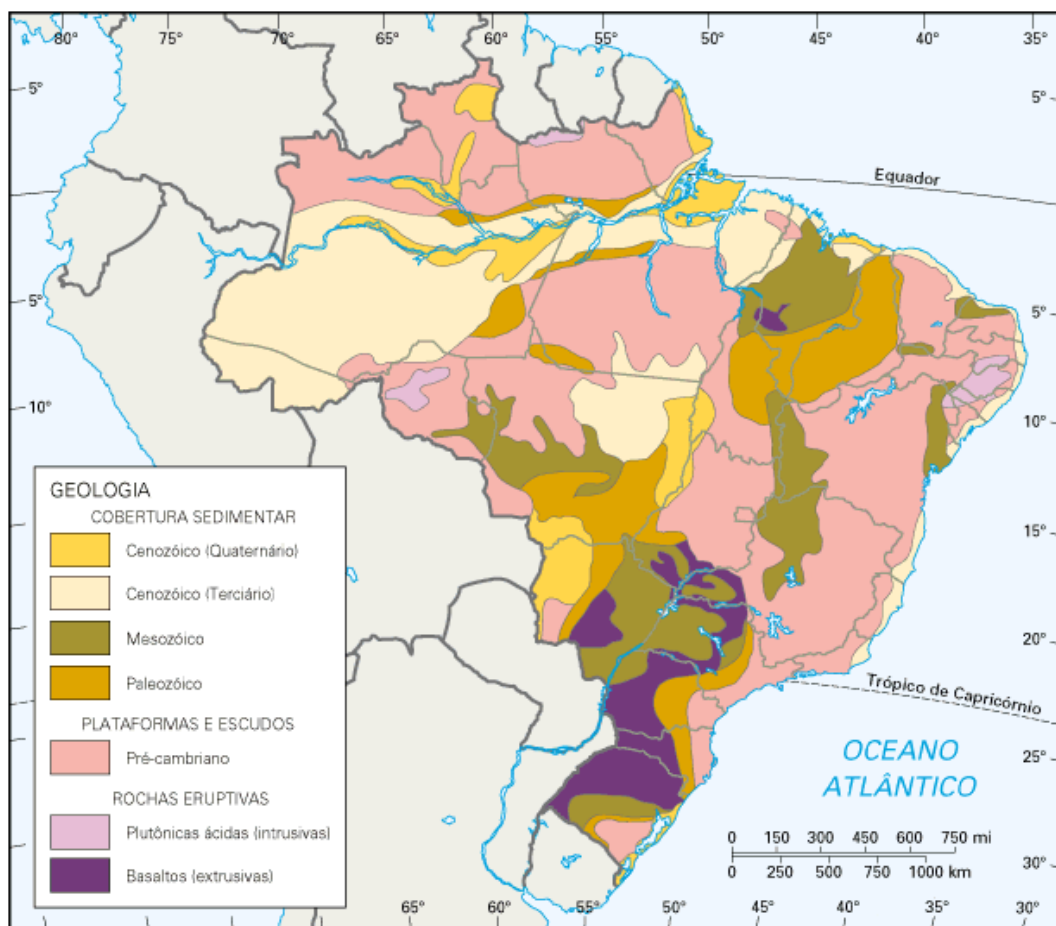


Figura 1: Mapa do Brasil de formação da cobertura sedimentar, em função do período de formação. <http://www.estudopratico.com.br/estrutura-geologica-do-brasil/>

Apesar de essas características fazerem dessas regiões inapropriadas para receber sobrecargas, muitas vezes é possível se fazer interferências técnicas com o objetivo de melhorar as condições de suporte do maciço de fundação, melhorando as condições de estabilidade do sistema acelerando e/ou reduzindo os recalques ou ainda ambos. Entre as diversas Técnicas de Melhoramento de Solos Moles, que são apresentadas na Figura 2, as Colunas de Brita tem grande espaço no mercado por seus diversos benefícios, sendo objeto de grande interesse em diversas pesquisas.

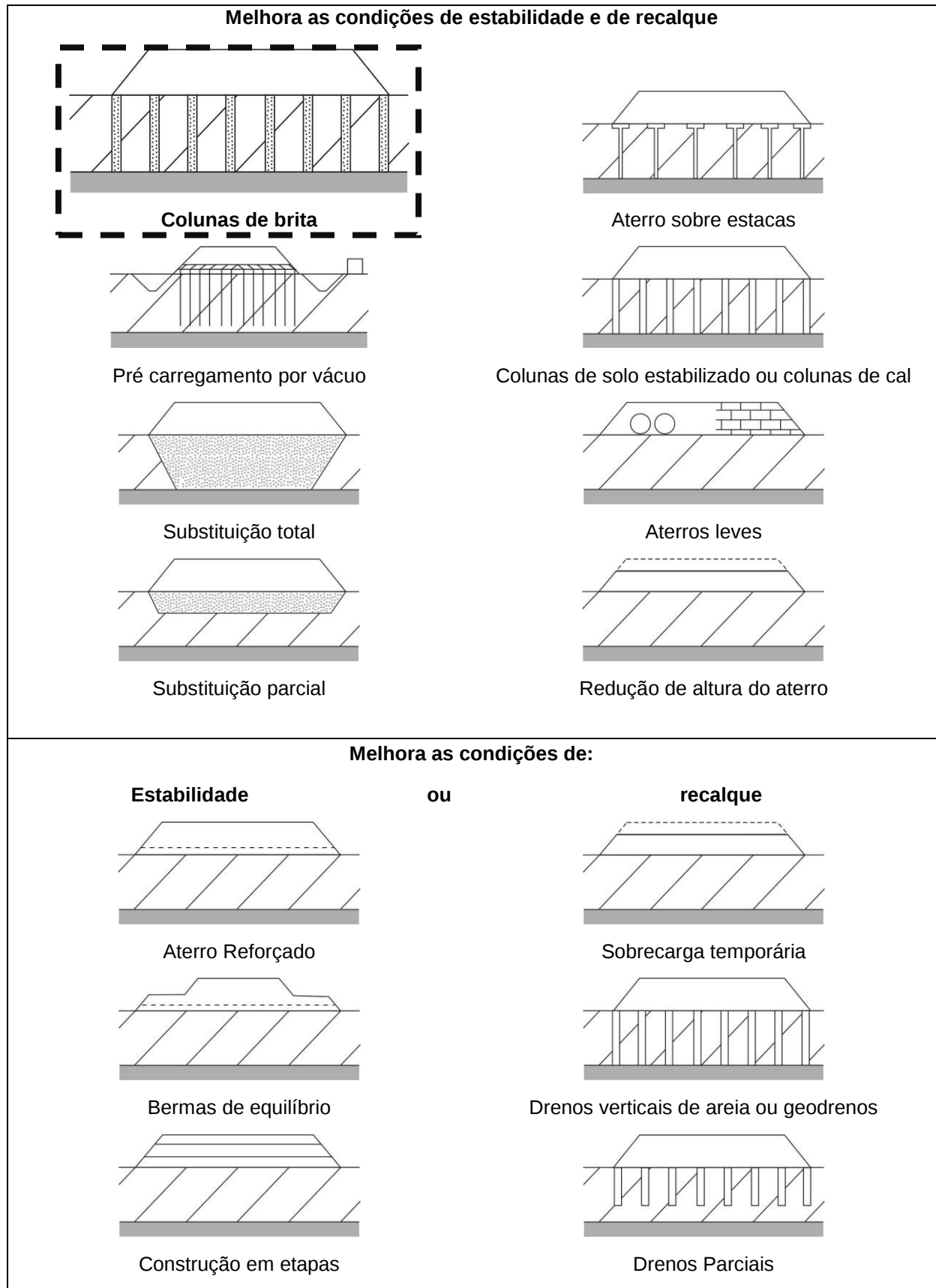


Figura 2: Diferentes técnicas de melhoramento de solos moles (adaptada de Almeida e Marques, 2010).

As colunas de brita são amplamente utilizadas quando há restrição de prazo, e pode ser utilizada concomitante com o uso das técnicas de aterro reforçado, de construção em etapas e de sobrecarga temporária, por exemplo.

2.2. Colunas Granulares

Colunas granulares vêm sendo usadas desde a década de 1950 como técnica de melhoramento de solos moles e nessa técnica são utilizados materiais granulares, como areia e brita, que possuem condutividade hidráulica elevada, se comparado aos solos argilosos. A Tabela 1 apresenta a diferença da condutividade hidráulica entre os diversos materiais que podem compor um maciço de fundação.

Tabela 1: Relação entre tipos de solos, condutividades hidráulicas e grau de condutividade hidráulica (Adaptada de);

Material	Condutividade Hidráulica (cm/s) (Lambe e Whitman, 1969)	Grau de Condutividade Hidráulica (Terzaghi e Peck, 1967)
Rochas Maciças	$< 10^{-9}$	Praticamente Impermeável
Argilas Sedimentares	10^{-7} a 10^{-8}	Muito Baixo
Solos Compactados (Kv)	10^{-6} a 10^{-7}	Muito Baixo
Siltes	10^{-6}	Muito Baixo
Solos Compactados (Kh)	10^{-4} a 10^{-6}	Muito Baixo/Baixo
Areias Finas	10^{-3}	Baixo/Médio
Areias Grossas	10^{-2}	Médio
Brita	$> 10^{-1}$	Alto

A água é considerada um líquido incompressível, portanto, quando o solo saturado recebe uma sobrecarga, a água presente no solo é submetida a uma

carga de pressão, chamada de poropressão. A ação dessa pressão faz com que a água se movimente no sentido de menor carga hidráulica total. Como as areias e britas tem uma condutividade hidráulica muito maior do que as argilas, nas regiões onde está presente esse material mais granular as poropressões são dissipadas mais rapidamente, por isso considera-se que essa região é de baixa carga de pressão. A Figura 3 ilustra um aterro sobre fundação de solo argiloso, com e sem presença de colunas granulares e seus respectivos equipotenciais de carga de pressão zero.

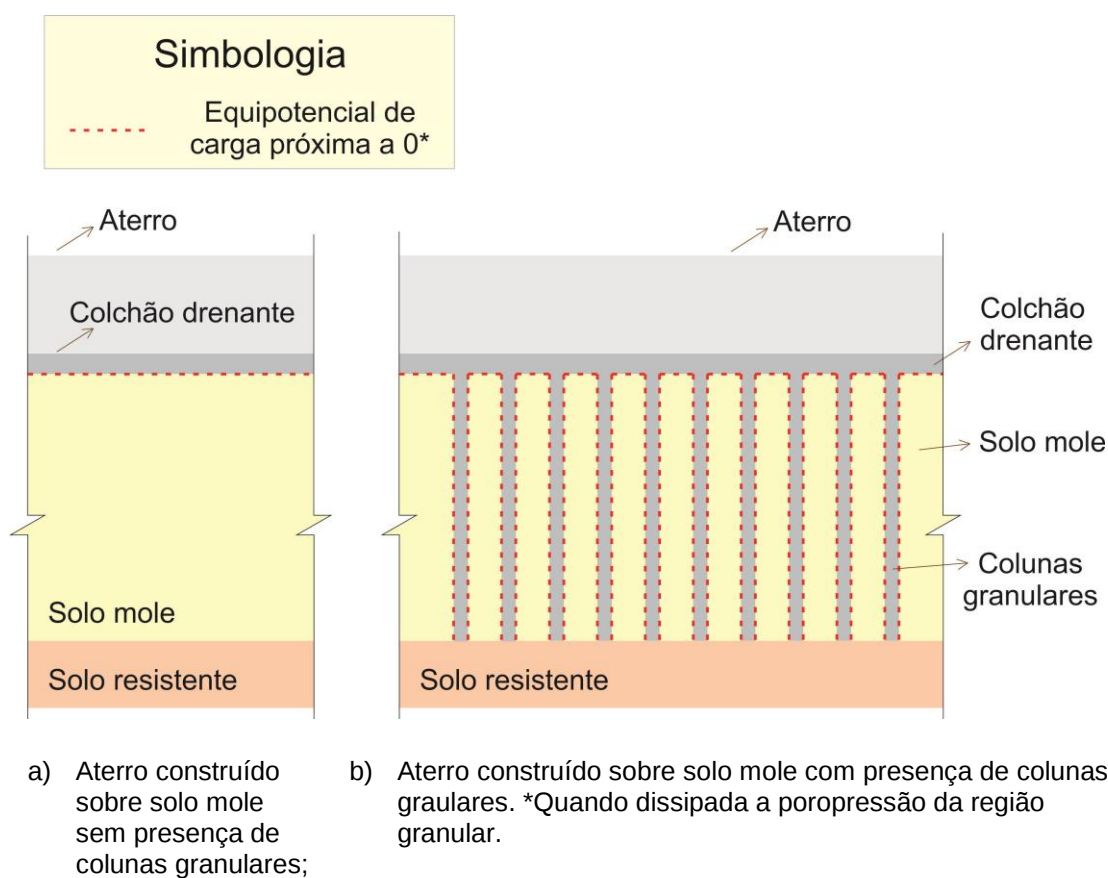


Figura 3: Delimitação da região de equipotencial de carga de pressão próxima a 0 no solo com e sem reforço

Como o material granular tem elevada condutividade hidráulica, que segundo Fichtner (2008b), deve ser 1000 vezes maior do que o da camada argilosa, essa é uma região preferencial para o fluxo da água, mecanismo também chamado de drenagem radial, e por isso a utilização dessa técnica gera condições para que aconteça a aceleração dos recalques esperados. Segundo a Lei de Darcy apresentada na Equação 1, a velocidade do adensamento depende

da condutividade hidráulica do solo e do gradiente hidráulico, já que o gradiente hidráulico se torna muito maior quando é empregado esse método, como mostrado na Equação 1.

$$v_p = k_p \cdot \frac{\Delta h}{E/2} \quad (1)$$

onde:

v_p = velocidade de percolação;

k_p = condutividade hidráulica;

$\frac{\Delta h}{E/2}$ = gradiente hidráulico, onde Δh é a perda de carga e $E/2$ é a distância

de percolação.

Além da velocidade do adensamento, a variação do Fator tempo (T), utilizado para estimativa do tempo de adensamento, também justifica a aceleração dos recalques quando empregado o método de melhoramento de solos moles com colunas de brita. Analisando esse parâmetro pode-se observar a relevância desse método já que o tempo de adensamento varia com o quadrado da distância de percolação, como apresentado na Equação 2.

$$T = \frac{c_v \cdot t}{H_d^2} \quad (2)$$

onde:

T = fator tempo;

c_v = obtido a partir do ensaio de adensamento;

t = tempo de adensamento;

$H_d = E/2$ = distância de percolação.

A Figura 4 ilustra a diferença de distância de percolação entre solos argilosos com e sem reforço, onde o valor de $E/2$ é da ordem de metros quando não há drenos verticais e a camada abaixo do solo mole é drenante, e da ordem de decímetros quando se emprega esse tipo de técnica de melhoramento de solos moles.

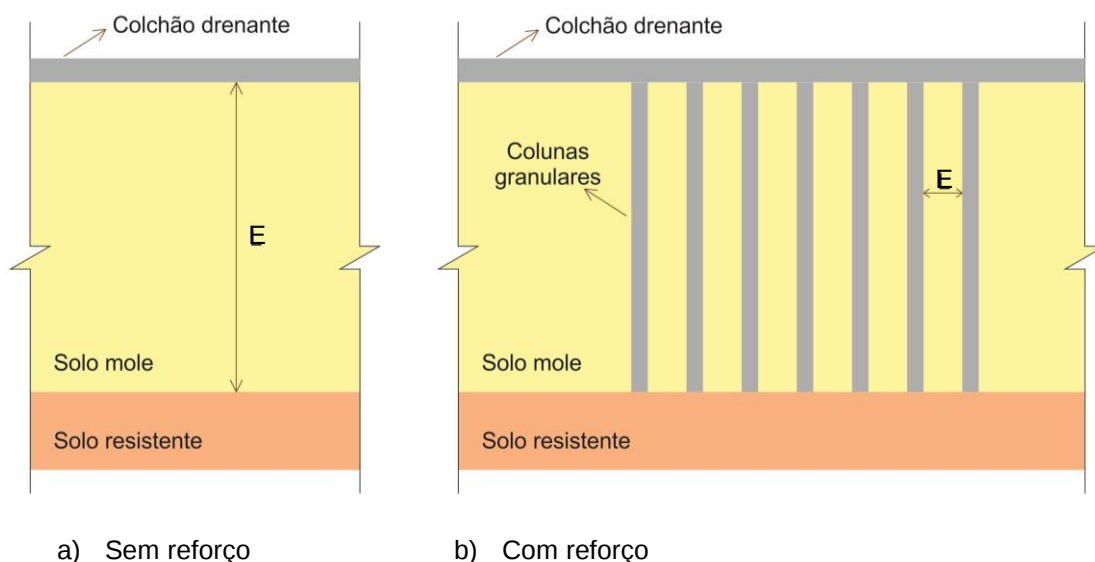


Figura 4: Perfis ilustrativos do solo mole com e sem reforço

Além de contribuir para a aceleração dos recalques, a malha de colunas granulares também tem a função de reduzir a magnitude de recalque que o solo sofre ao receber uma sobrecarga. Isso se deve ao fato de que, segundo Almeida e Marques (2010), quando apoiado em solo mais resistente, o conjunto de colunas granulares torna-se em condições de absorver grande parte da carga transmitida pelo aterro ao solo mole.

Portanto, para se obter maior eficiência da técnica e para os casos de argilas muito moles, é usual que as colunas sejam apoiadas em solo resistente. Mas elas também podem ser flutuantes, principalmente quando as camadas são extremamente espessas. Nesse caso, a ponta da coluna estará na camada argilosa.

A presença da malha de colunas no solo mole contribui também para o aumento da resistência ao cisalhamento do conjunto solo-coluna, possibilitando o aumento do fator de segurança em análises de estabilidade do maciço de fundação.

As colunas granulares podem ainda ser construídas com ou sem encamisamento de geotêxtil. O encamisamento tem a função de separar o material granular do solo argiloso, promover um confinamento da coluna, e consequentemente, aumentar sua capacidade de carga.

Antes de estudar com mais detalhes os condicionantes para o desempenho das colunas granulares, é importante conhecer dois conceitos que cercam os estudos relacionados a esse tema. São eles os conceitos de Célula Unitária e Comprimento Crítico, analisados por Almeida e Marques (2010) e Hu (1995).

2.2.1. Conceito de Célula Unitária

O conceito de célula unitária é um conceito comumente aplicado à ciência dos materiais, sendo a menor unidade de uma estrutura cristalina simétrica que se repete indefinidamente. Fazendo uma analogia à essa definição, esse conceito é aplicado a colunas de brita sendo a menor unidade que se repete composta pela coluna e argila presente no seu entorno. Seguindo esse princípio, considera-se que a célula unitária é independente e não sofre influência das regiões vizinhas.

Na Figura 5a é apresentada a célula unitária e na Figura 5b é mostrada a malha triangular formada pelo conjunto de colunas, também chamado de grupo de colunas, onde d_e é o diâmetro equivalente da célula unitária, L é o comprimento da coluna, l é o espaçamento entre colunas e d é o diâmetro das colunas.

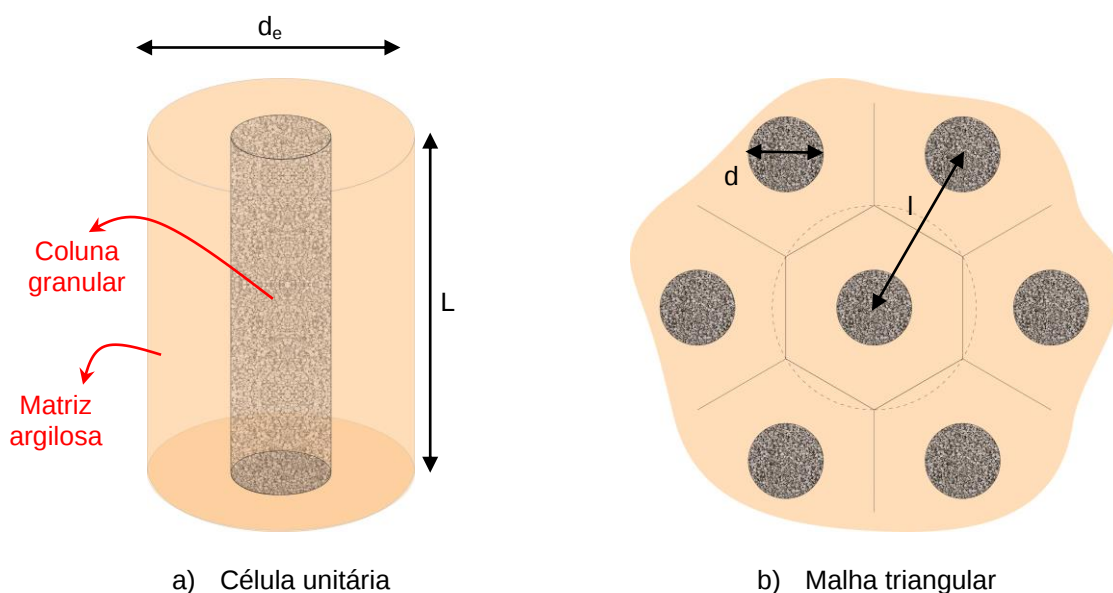


Figura 5: Esquema de célula unitária.

Ambily *et al.* (2007) concluíram por meio de análises numéricas e experimentais que o conceito de célula unitária é aplicável apenas para colunas centrais de um grupo de colunas submetidas ao mesmo carregamento. Isso explica a ocorrência de diferentes tipos de rupturas somente em algumas colunas granulares, enquanto outras não chegam a ruptura, mesmo que façam parte de um mesmo grupo de colunas granulares submetidas a mesma sobrecarga.

Sendo assim, o conceito de célula unitária auxilia na definição de critérios de projeto, como disposição das colunas em malha quadrada ou triangular, diâmetro equivalente, área da coluna, área total da célula e área de solo mole no entorno da coluna. Segundo estudo realizado por Ambily *et al.* (2007), é possível executar estudos sobre o padrão de comportamento da coluna de brita a partir do estudo de uma célula unitária, limitando-se, portanto, à condição de aplicação desse conceito apenas para colunas centrais.

2.2.2. Conceito de Comprimento Crítico

Em colunas de brita, comprimento crítico é o comprimento longitudinal limitador para a coluna ser ou não ser considerada esbelta, onde todas as colunas com o comprimento maior do que o crítico são consideradas esbeltas. A partir desse conhecimento, a coluna será classificada como longa ou curta. O comprimento crítico varia em função do diâmetro da seção transversal.

Esse é um conceito importante para a previsão de ocorrência de rupturas, pois caso a coluna seja considerada esbelta ou longa, será mais provável a ocorrência de rupturas cujas deformações serão laterais, já nas colunas menos esbeltas ou curtas, será mais provável a ocorrência de rupturas cujas deformações são verticais.

Segundo Hu (1995), colunas curtas tem razão L/d e L/D menores ou iguais a 9,1 e 1, respectivamente, e colunas longas têm razão L/d e L/D iguais ou maiores que 13,6 e 1,5, respectivamente. A Figura 6 apresenta em croqui L (comprimento da coluna), d (diâmetro da coluna) e D (diâmetro do pé da coluna).

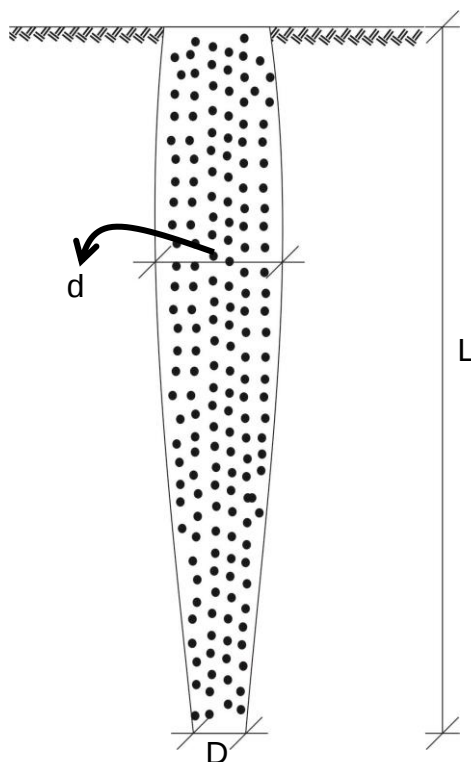


Figura 6: Croqui ilustrativo das características utilizadas na definição de comprimento crítico.

2.2.3. Métodos Construtivos

Existem na literatura diversas técnicas conhecidas para a construção de colunas granulares. Entre elas, as mais utilizadas são as técnicas de vibrosubstituição e compactação por lançamento ou apiloamento. Barksdale e Bachus (1983), Babu *et al* (2013), Almeida e Marques (2010) e Lima (2012) apresentam uma revisão sobre construção, análise e comportamento de colunas granulares.

A vibrosubstituição é uma técnica em que as colunas são instaladas no solo mole com o auxílio de um vibrador ilustrado na Figura 7, e sua construção pode ser pelo sistema seco ou úmido.

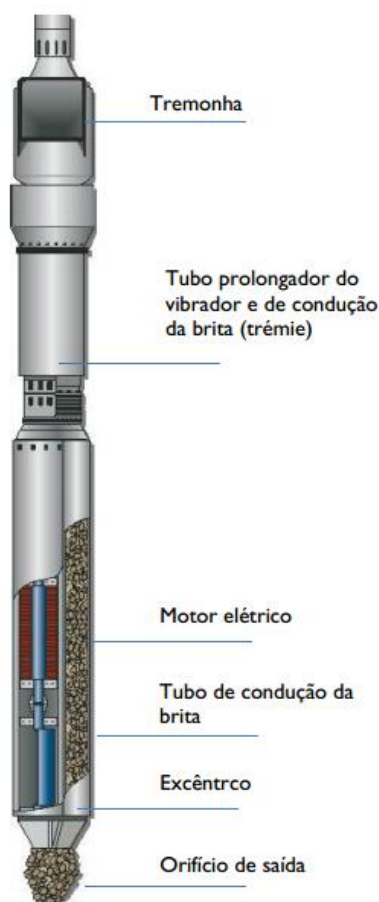


Figura 7: Vibrador utilizado na técnica de vibrosubstituição para a construção de colunas de brita (Keller Brasil, 2014).

As vantagens da Aplicação da Coluna de Brita por vibrosubstituição são que é possível o emprego dessa técnica em locais com o nível de água alto, podendo ser utilizada em obras *offshore* ou em lagoas/rios e as profundidades mais utilizadas para o tratamento são de 6 a 20 m, porém, colunas com mais de 30 m já foram realizadas.

No sistema seco (*dry system*), utiliza-se ar comprimido e o peso do conjunto do vibrador para se atingir a profundidade desejada. Esse processo é ilustrado na Figura 8, onde inicialmente há a preparação do equipamento e enchimento da caçamba com material granular, como é apresentado na Figura 9. A caçamba é içada e em seguida lança-se a brita dentro do tubo de ponta fechada até seu preenchimento. Penetra-se o vibrador, com o tubo fechado, até a profundidade prescrita em projeto, com o auxílio de jatos de ar comprimido. Por meio de curtos movimentos ascendentes e descendentes do vibrador já com a ponta aberta, o

material granular é liberado para dentro do furo e compactado em etapas por meio de vibração. Essa operação é feita em etapas até que se atinja a superfície do terreno, quando será realizado o acabamento. O processo úmido (*wet system*) é semelhante ao seco, com a diferença de utilização de jato de água no lugar de jato de ar comprimido.

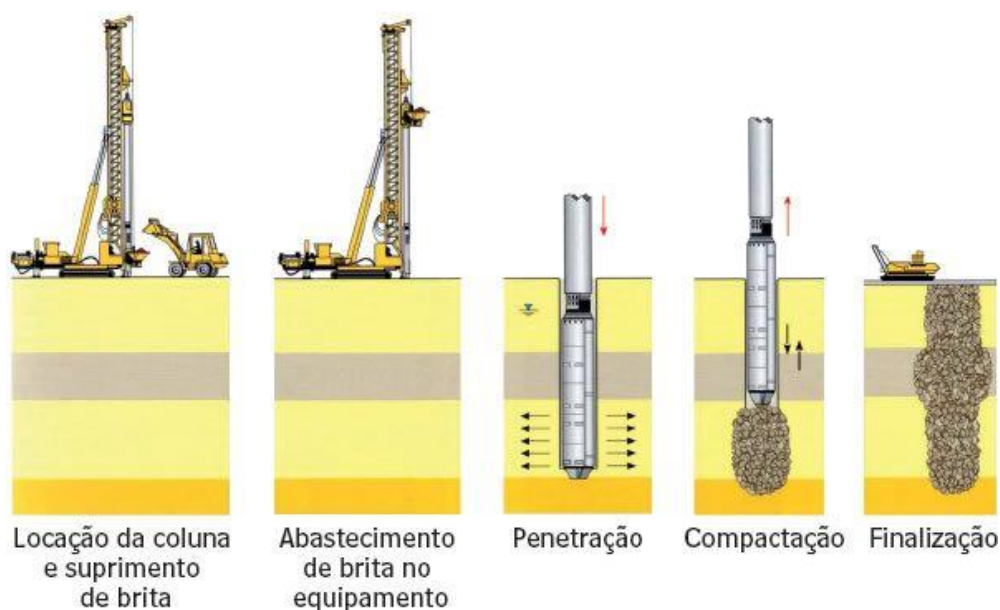
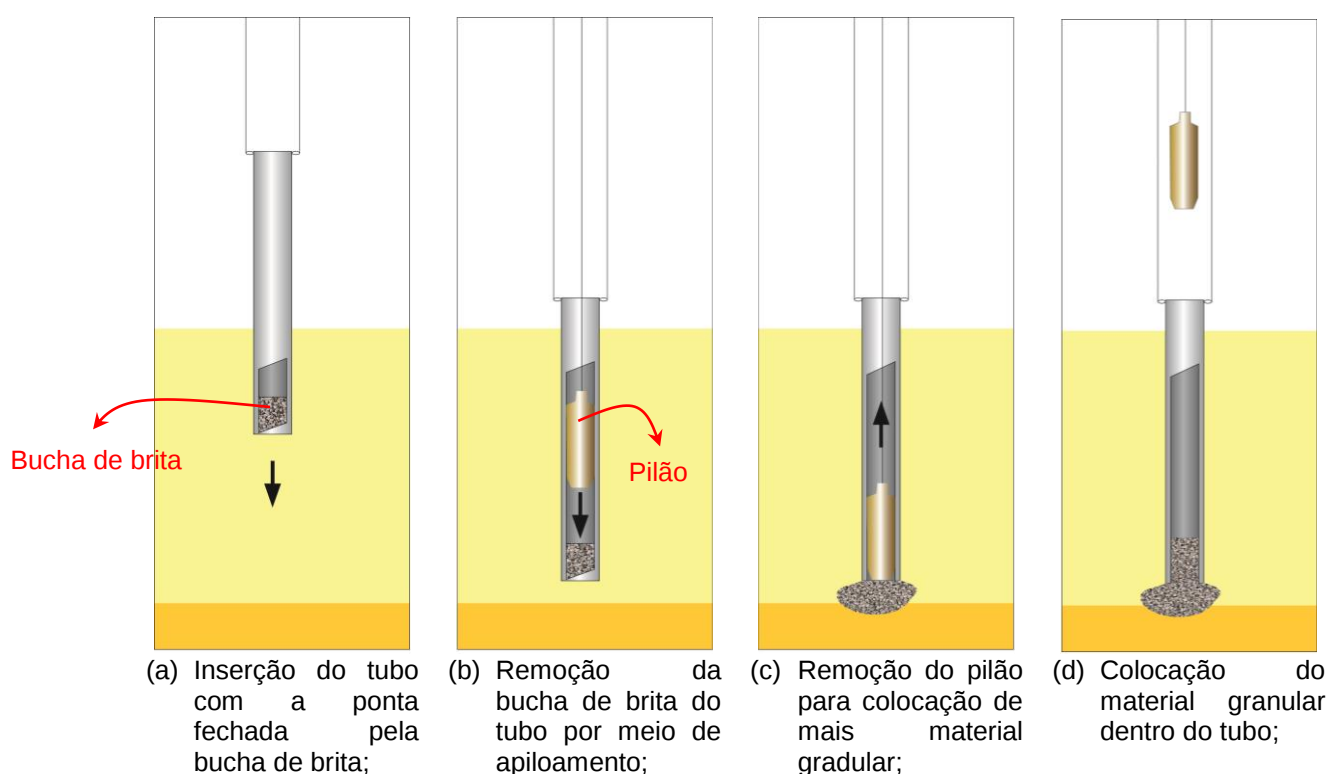


Figura 8: Etapas construtivas da técnica de melhoramento de solos moles por vibrosubstituição (Keller Brasil, 2014).



Figura 9: Enchimento da caçamba, primeira etapa do processo de construção de colunas de brita pela técnica de vibrosubstituição (Keller Brasil, 2014).

Na Técnica de Compactação por lançamento ou apiloamento, é utilizado um tubo para a execução do furo. O tubo pode ser de ponta fechada ou aberta. No furo cravado com o tubo de ponta fechada o material é deslocado à medida que o furo é feito, já no furo aberto com o auxílio do tubo de ponta aberta, é necessário retirar o material argiloso que fica dentro do tubo devido à cravação. Após construído o furo, o material granular é lançado dentro do tubo ainda inserido no solo e à medida que o tubo vai sendo retirado, o material pode ser ou não compactado com o auxílio de um pilão. Esse tipo de construção pode sofrer variações devido as diversas tecnologias que foram desenvolvidas para esse fim, como por exemplo, o tubo de ponta fechada pode ser fechado por abas articuladas ou com tampão de “bucha” de brita, sendo o procedimento inicial semelhante à construção das estacas tipo Franki. O procedimento construtivo utilizando bucha de brita está ilustrado na Figura 10.



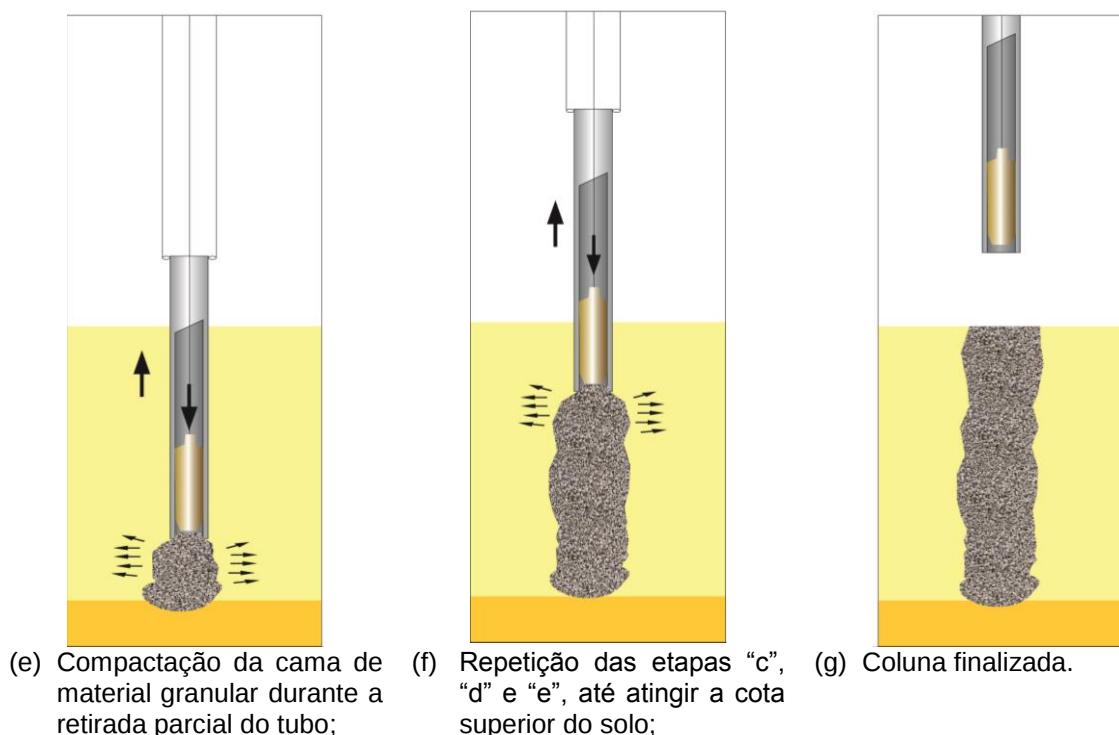


Figura 10: Procedimento construtivo de coluna de brita compactada por apiloamento, com o auxílio de bucha de brita como vedação do tubo durante a perfuração.

As técnicas de colunas construídas com compactação por lançamento ou apiloamento possibilitam o emprego do encamisamento. Nesses casos o geotêxtil é inserido internamente no tubo antes do lançamento do material granular.

2.2.4. Condicionantes para o desempenho de Colunas Granulares

O desempenho de uma coluna de brita ao longo de sua vida útil depende de diversos fatores, tanto na função de dreno, quanto na de reforço. A ocorrência de condicionantes pode ocorrer devido ao processo construtivo, ao carregamento ou simplesmente pelo contato entre argila e material granular. Entre eles, destacam-se como principais a variação da seção efetiva, a presença da zona de amolgamento e a ocorrência de rupturas.

2.2.4.1. **Variação da Seção Efetiva**

Durante a construção da coluna, o material granular pode ser compactado por vibração, apiloamento ou pelo peso próprio do material lançado. Segundo Castro (2014), o deslocamento horizontal da argila devido à construção da coluna granular e ao desenvolvimento das tensões horizontais ao longo da coluna faz com que o diâmetro da seção transversal da coluna seja maior do que o diâmetro nominal do tubo utilizado na construção.

À medida que a compactação do material granular é feita, a argila do seu entorno sofre deformações. Essas deformações são menores à medida que a distancia radial a partir da face da coluna aumenta, pois quanto mais distante da estrutura drenante, mais tempo o solo se mantém na condição não drenada. Isso explica a conclusão obtida por Guetif *et al.* (2007), em que a argila do entorno da coluna sofre um enrijecimento gradativo radialmente, tornando-se mais rígido em regiões mais próximas da coluna, e por isso para de se deslocar.

2.2.4.2. **Presença da Zona de Amolgamento (*Smear Zone*)**

O processo construtivo da coluna de brita faz com que a região de argila no entorno da coluna seja amolgado, enrijecendo seu entorno, além desse fato, durante o adensamento do solo argiloso a água segue em direção à coluna granular que funciona como drenos verticais. Como não há material filtrante entre a argila e o material granular, é possível que o deslocamento da água carregue material fino, o que proporciona a contaminação do material granular com a intrusão de finos. Segundo Weber *et al.* (2010), essas regiões são consideradas como uma zona de transição, ou *smear zone* e Fichtner (2008b) diz que a existência da zona de transição reduz o diâmetro efetivo da estaca sem comprometer sua função de dreno (*apud* Lima, 2012).

2.2.4.3. **Ruptura**

Os mecanismos de ruptura que ocorrem em colunas de brita podem ser observados individualmente coluna a coluna, considerando que há um padrão de comportamento, como idealizado no conceito de célula unitária.

Babu (2013) sugere que podem ocorrer três tipos de rupturas em colunas de brita quando analisadas individualmente e considerando-se a camada de solo argiloso homogênea. São elas ruptura por abaulamento, por cisalhamento ou por punção, como é mostrado na

Figura 11.

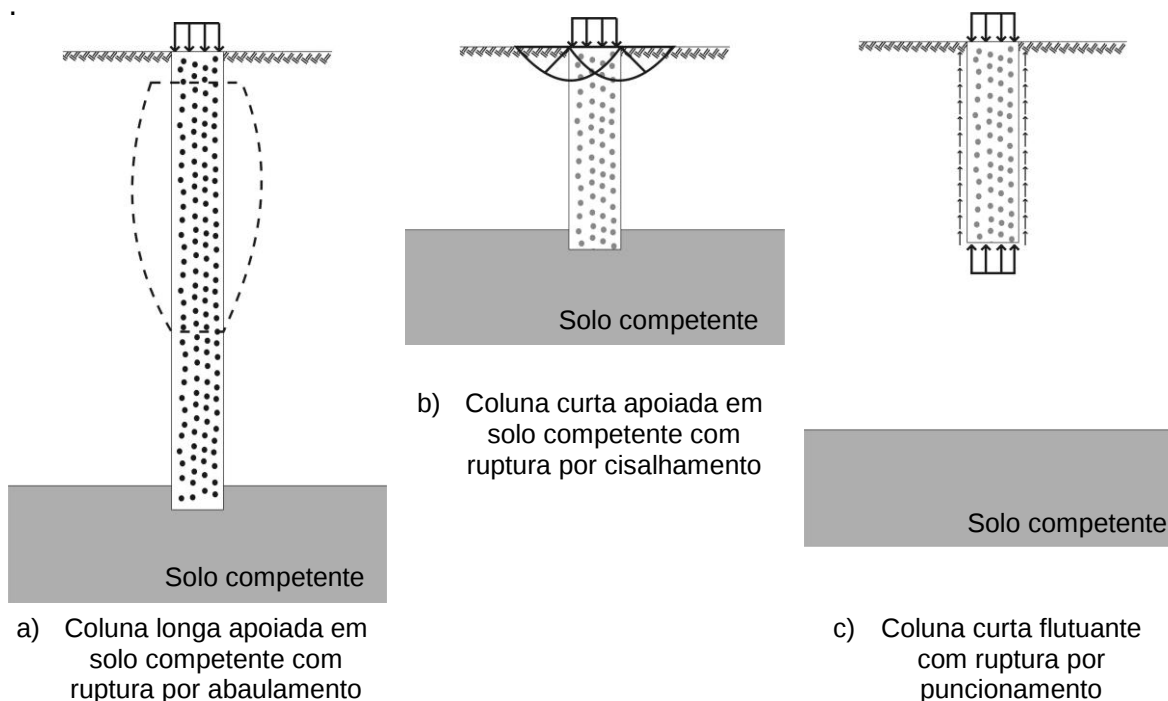


Figura 11: Tipos de rupturas de colunas granulares

Vale ressaltar que nos casos em que a camada argilosa não é homogênea, é possível ocorrer ruptura por cisalhamento na coluna onde há variação de resistência do meio argiloso. A variação de resistência do meio argiloso se dá no encontro entre camadas de solo mole de características distintas. Portanto, é possível que ocorra esse tipo de ruptura independente da característica de comprimento crítico da coluna granular, bem como da condição de apoio.

As rupturas apresentadas na Figura 11 ocorrem, principalmente, em função da esbelteza e do tipo de apoio da ponta da coluna. Na Tabela 2 são

apresentados os tipos de rupturas e as condições das colunas para que ocorram as rupturas.

Tabela 2: Tipos de rupturas, seus condicionantes e características.

Tipo de Ruptura	Condição de esbeltez	Tipo de apoio	Características
Abaulamento	Colunas longas	Apoiada em Solo competente ou flutuante	Ocorrência de deslocamentos horizontais na lateral da coluna ocasionando o aumento da seção transversal em algumas regiões.
Cisalhamento	Colunas curtas	Apoiada em Solo competente	Ocorrência de rupturas por cisalhamento.
Puncionamento	Colunas curtas	Flutuante	Ocorrência de deslocamento vertical excessivo da coluna por inteiro, por puncionamento da camada de solo onde a ponta da coluna é apoiada.

Quando se avalia o comportamento de um conjunto de colunas granulares, as rupturas que ocorrem nelas, individualmente, podem ser diferentes das explicitadas na Tabela 2. Isso acontece devido à existência de interação entre as colunas granulares de um grupo delas.

Seguindo essa direção, estudos como Hu *et al.* (1997), Wood *et al.* (2000), Ambily *et al.* (2007) mostram que as rupturas ocorrem inicialmente nas colunas das extremidades e de forma assimétrica. Nestes casos, a ruptura não atende aos padrões de ruptura analisados para colunas individuais como mostrado na Figura 12. Isso se deve pela desigualdade de confinamento no entorno das colunas próximas à borda do aterro, levando a rupturas com deformações laterais ou cisalhantes no sentido de onde o confinamento é menor. Já as colunas centrais atendem à condição da célula unitária, ocorrendo ruptura por abaulamento.

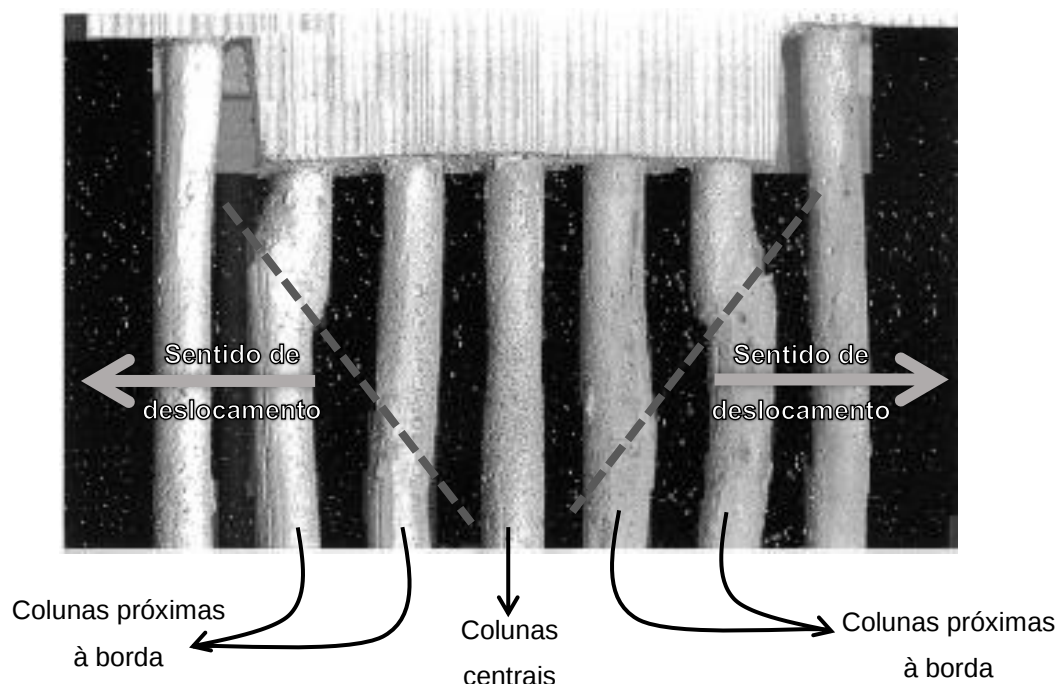


Figura 12: Ruptura de colunas de borda (adaptada de Hu, 1995)

2.2.5. Avaliação da integridade em escala real

Devido à grande dificuldade de avaliação da integridade de obras desse porte *in situ*, poucos trabalhos desse tipo são encontrados. Fichtner (2008b) exumou 6 colunas do pátio de minério Siderúrgica Thyssen Krupp Companhia Siderúrgica do Atlântico – TKCSA até 2,5m de profundidade com o intuito de realizar ensaios granulométricos, verificar o diâmetro da coluna, além de avaliar a zona de colmatção. Neste trabalho foi possível observar que as colunas apresentavam forma circular bem definida e diâmetro variando entre 0,95m e 1,10m, o coeficiente de permeabilidade das amostras das colunas granulares variaram entre $5,87 \times 10^{-5}$ m/s e 1,96m/s.

2.3. Modelagem Física

Segundo Thorel *et al.* (2008), a modelagem física é uma importante ferramenta utilizada em projetos de obras geotécnicas graças à geração de macro gravidade, sendo utilizada tanto na análise do comportamento de solos e rochas, quanto dando suporte à modelagem numérica a partir do uso de instrumentação miniaturizada. Essa ferramenta tem como objetivo simular em escala reduzida o comportamento de uma estrutura, para isso se faz necessária

a representação de condições em grande escala através de regras para aumento proporcional de tempo e dimensão do modelo de dimensões reduzidas como sugere Penereiro (2010), regras essas propostas pela Teoria da Semelhança Física de Galileo.

A teoria da semelhança física propõe que, cumprindo as condições de semelhança física, é possível prever o comportamento do protótipo a partir de modelos reduzidos. Tanto no protótipo quanto do modelo reduzido, sabe-se que os parâmetros envolvidos são os mesmos e a relação entre as magnitudes, no protótipo e no modelo, de um mesmo parâmetro, é conhecida como fator de escala.

Portanto, para que seja possível cumprir as condições de semelhança, é importante que se conheça os fatores de escala e as relações adimensionais entre as variáveis envolvidas nos problemas, chamadas de números π . Como os números π são adimensionais, essa correlação entre as variáveis é aplicável tanto para os protótipos quanto para os modelos reduzidos.

2.3.1. Modelagem reduzida

Em modelagens físicas de obras geotécnicas é importante que seja observado o estado de tensões no modelo para que ele seja equivalente ao do protótipo. Apesar de ser possível ser realizada uma análise comportamental qualitativa em modelagens reduzidas a 1g, como o realizado por Rackwitz e Schubler (2010), que se mostrou satisfatório para este fim, o estudo realizado por Castro *et al* (2013), que comparou quantitativamente valores de tensões obtidos na modelagem reduzida e valores obtidos empiricamente, apresentou resultados insatisfatórios, pois as variações dos ângulos de cisalhamento e de dilatação não ocorrem no caso da modelagem reduzida sem ser submetida a uma aceleração da gravidade maior do que a atmosférica por ter uma variação muito pequena no estado de tensões. Esse fato pode ser analisado baseado no estudo feito por Hettler (2010), que explica as possibilidades e limitações de modelagens a 1g e confirma que há a influência do nível de pressões nas deformações e esse fenômeno pode ser explicado através da teoria da semelhança.

Para que se cumpra a teoria da semelhança física em pesquisas envolvendo comportamento geotécnico, utiliza-se a centrífuga geotécnica, como as apresentadas nas Figuras 12 e 13, como artifício para aumentar a gravidade atuante no modelo.



Figura 13: Centrífuga geotécnica de viga (UENF).



Figura 14: Centrífuga geotécnica de tambor (COPPE).

Seguindo a Teoria da Semelhança Física, Taylor (1995) listou as escalas utilizadas em centrífuga geotécnica que são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Lei de escala em modelagem em centrífuga

Grandeza	Fator Escala (N)
Gravidade	N
Comprimento	1/N
Densidade	1
Massa	1/N ³
Força Concentrada (F)	1/N ²
Área	1/N ²
Tempo (T)	1/N ²
Tensão (σ)	1
Deformação (ε)	1
Velocidade (v)	1
Volume (V)	1/N ³
Energia	1/N ³
Tempo (Difusão)	1/N ²
Tempo (Relaxação)	1
Momento Fletor	1/N ³
Aceleração Inercial	N

A modelagem física pode ser utilizada para analisar o comportamento de colunas granulares seguindo diferentes linhas de estudo, como por exemplo, analisar os mecanismos de transferência de carga do colchão drenante para o grupo de colunas. Entre eles, Okyay *et al.* (2014) analisaram o mecanismo de transferência de carga de forma geral, observando-se a influência do diâmetro da

coluna, da altura do colchão drenante, dos recalques diferenciais que ocorrem no colchão drenante e dos ciclos de carregamento e descarregamento. Já Aslam e Ellis (2010) concluíram que a altura do colchão drenante tem grande influência no mecanismo de transferência de carga e Baudouin *et al.* (2010) identificaram a razão mínima entre a altura do colchão drenante e a distância entre as colunas para que fosse evitado o recalque diferencial. Blanc *et al.* (2012) analisaram a diferença entre o mecanismo de transferência de carga entre colchões drenantes com e sem reforço de geossintético e pôde-se concluir que além de existir o efeito de arqueamento, quando há o uso de geossintético para este fim, os recalques diferenciais no colchão drenante são menores e Blanc *et al.* (2013) estudou os mecanismos de transferência comparando os resultados obtidos em modelagem em centrífuga e analítica.

Outros estudos envolvendo modelagem física, utilizam essa ferramenta para calibrar modelagens numéricas, como os trabalhos realizados por Ma *et al.* (2014) e Gautray *et al.* (2013).

Para utilizar-se dessa ferramenta para a modelagem física de obras geotécnicas, que é a centrífuga geotécnica, é necessário que a metodologia de construção do modelo seja compatível com o método de construção *in situ*. Para isso alguns autores desenvolveram estudos e ferramentas que auxiliassem na construção de colunas granulares em centrífuga geotécnica. Weber *et al.* (2006) e Yi *et al.* (2010) estudaram a influência da compactação da coluna do modelo na mudança do estado de tensões e no comportamento da argila e Weber (2004) desenvolveu uma importante ferramenta de construção de colunas granulares em vão para utilização em centrífugas geotécnicas de tambor.

2.3.2. Avaliação da integridade em modelos reduzidos

Em pesquisas onde há a necessidade de se investigar a variação da geometria do objeto de estudo, mostra-se necessário a exumação do objeto de estudo para se obter informações conclusivas por meio de análises a olho nu ou com o uso de ferramentas óticas ou eletrônicas. A exumação pode ocorrer de forma mais ou menos invasiva. Alguns trabalhos como Hu (1995), Almeida (1984), Weber *et al.* (2010) e outros, Ambily *et al.* (2007) apresentam formas

diferentes de amostragem de colunas de brita para investigação de sua geometria após a construção e o carregamento.

A exumação por simples escavação é uma técnica onde não se usa a introdução de fluídos para garantir a disposição original dos grãos. Nessa técnica é feita a escavação pouco a pouco de modo a se obter a informação desejada, como no exemplo da Figura 15. Nesse caso a aplicação do método foi para uma análise qualitativa da integridade e forma das colunas em questão.

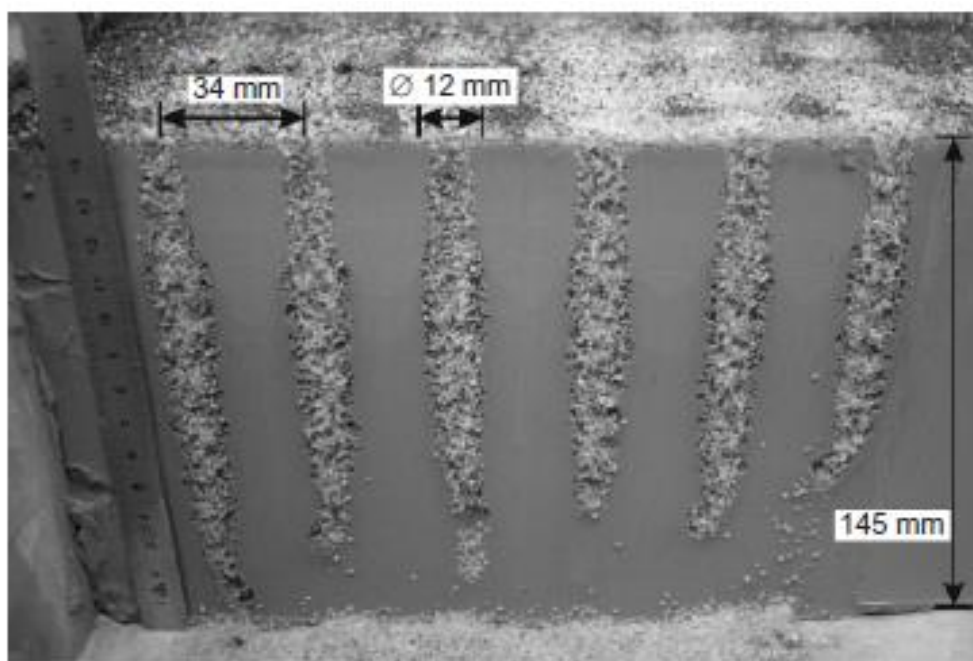


Figura 15: Seções verticais da malha de colunas do teste em centrífuga. Weber *et al.* (2010)

No método de exumação por preenchimento com resina é introduzida uma mistura de resina com um catalizador e água, com alta condutividade hidráulica, na coluna. Segundo Hu (1995), esse método se mostrou insuficientemente rígido para que as geometrias originais permanecessem perfeitas após a exumação.

No método de exumação com lançamento de reboco (*plaster*), deve-se introduzir o fluido na coluna, que ao endurecer mantenha a geometria da coluna. Para isso é utilizado um material com a viscosidade suficientemente baixa para

penetrar o material granular, com ou sem o auxílio de vácuo, mas que tenha viscosidade suficiente alta para impossibilitar a penetração na matriz argilosa. Após o enrijecimento do fluido, a amostra pode ser obtida a partir da remoção de toda matriz argilosa do seu entorno, sem alterar a disposição original dos grãos. Nas Figuras 15 e 16 são apresentados exemplos de estabilização da coluna com inserção de pasta de gesso.

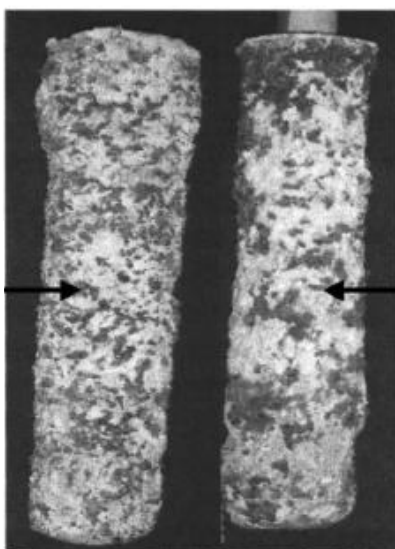


Figura 16: Exumação das colunas de brita de modelo reduzido (adaptada de Ambily *et al*, 2007)



Figura 17: Exumação de colunas de brita de modelos reduzidos de colunas de brita (Hu, 1995)

No método de fatiamento são retiradas amostras das seções transversais no formato de fatias, com o auxílio de linhas tensionadas ou facas, sem o auxílio da introdução de qualquer material com o objetivo de não desconfigurar a organização original dos grãos. Esse método é muito utilizado para confecção de amostras para análise com microscopia eletrônica e ótica. Weber *et al.* (2010) e Hu (1995) utilizaram essa técnica para análises mais ricas em detalhes.

2.4. Tomografia Computadorizada de Raio-X

Entre as importantes fontes de energia estão as acústicas, ultrassônicas, eletrônicas, além do espectro eletromagnético, principal fonte de energia para a formação de imagens.

O espectro eletromagnético, apresentado na Figura 18, pode ser subdividido em função de comprimento de onda, frequência ou energia, já que o comprimento de onda e a energia variam em função da frequência pelas Equações 3 e 4.

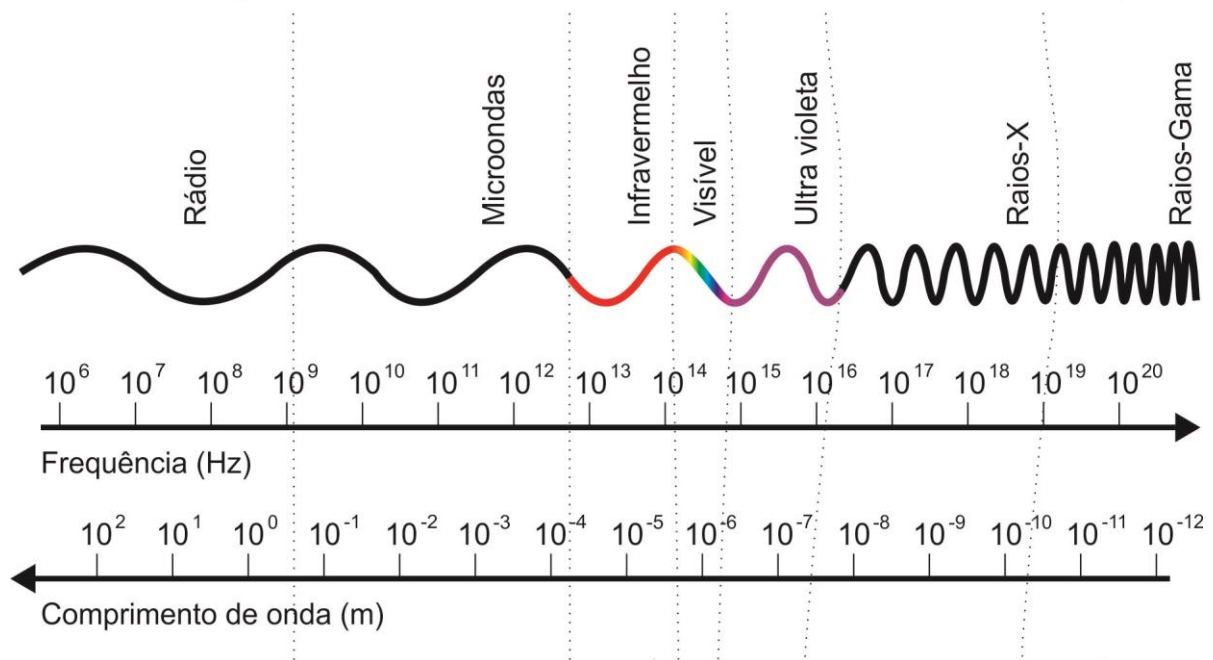


Figura 18: Espectro eletromagnético.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (3)$$

$$F = h\nu \quad (4)$$

onde λ é o comprimento de onda, c é a velocidade da luz no vácuo, ν é a frequência, F é a energia de foton e h é a constante de Planck.

Segundo Gonzalez e Woods (2010), o raio-X é uma fonte de radiação eletromagnética fortemente utilizada para formação de imagens como por exemplo a radiografia digital, angiografia e tomografia axial computadorizada, cujo uso mais comum é no diagnóstico médico, apesar de já ser amplamente utilizado também na indústria e na astronomia.

Na tomografia axial computadorizada industrial, a formação da imagem acontece por meio da intensidade de radiação, geralmente envolvendo raios-X de alta energia. A radiação que atravessa o material analisado é direcionada para um fotoconversor que converte os raios X em luz visível seguindo uma escala de cinza. A luminosidade é, por sua vez, captada por um sistema de digitalização sensível à luz. À medida que o material analisado gira em torno de seu eixo, é feita uma nova aquisição e assim são geradas diversas imagens resultantes da

projeção do raio refratado a cada incremento de rotação como ilustra a Figura 19. A partir das projeções é realizada a reconstrução da imagem, agora tridimensional, com todas as informações do material analisado.

Materiais com grande densidade, como por exemplo, os de origem metálica tem grande absorção de raios-X, portanto podem causar grandes interferências na projeção ou na reconstrução dependendo do objetivo da aplicação desse tipo de processo.

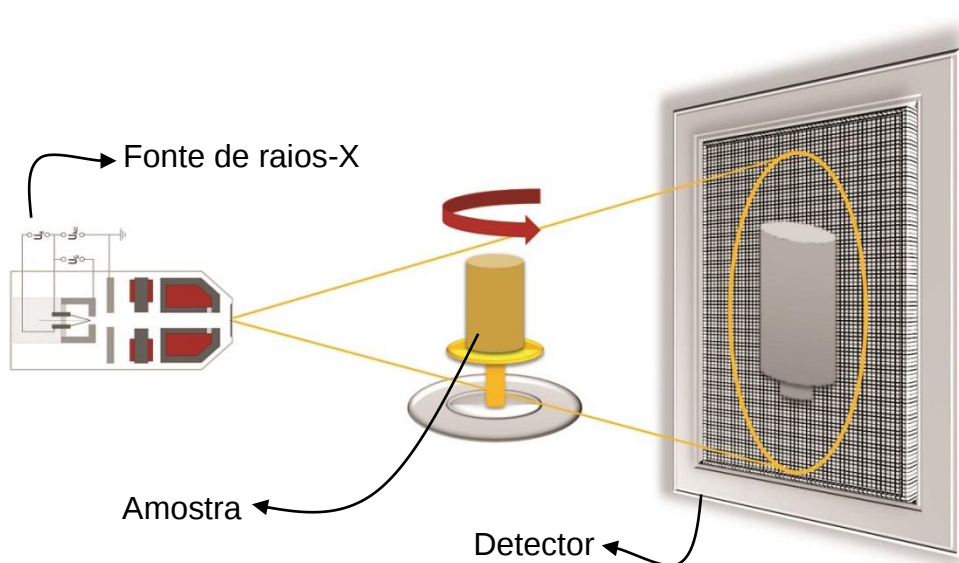


Figura 19: Sistema de aquisição de projeções. (Adaptado de Alves, 2015)

Essa técnica tem importante aplicação na área da Engenharia Civil, já que esse é um processo de investigação não destrutivo, permitindo que sua micro estrutura tenha menos possibilidade de ser danificada durante os processos de preparação da amostra e investigação.

Outra especialidade na Engenharia Civil onde a tomografia computadorizada de raio-X vem sendo aplicada desde os anos 80 são as geociências, contribuindo para a comunidade por meio de estudos voltados para microestrutura de solos. Entre eles, Bouckaert *et al.* (2013) e Loo *et al.* (2014) aplicaram esse método de análise em estudos relacionados ao desenvolvimento e à influência de agentes microbiológicos na microestrutura dos solos. Além

dessa aplicação, estudos relacionados à petrografia foram realizados por Domingues (2011) e Pico (2013), proporcionando a quantificação de características como porosidade, interconectividade dos poros, bem a geometria dos poros de rochas carbonáticas.

Dewanckele *et al.* (2012) utilizou interpretação de imagens de Tomografia Computadorizada de Raio-X de alta resolução para análise do efeito da exposição de Rocha de Arenito Calcário a gases SO_2 na variação de porosidade, onde porosidade, interconectividade e dimensões foram quantificadas em função do tempo com sucesso.

Ainda envolvendo análises e quantificações relacionadas à porosidade, Hall *et al.* (2010) observou e quantificou as deformações devido a aplicação de carga em areia por meio de micro tomografia de raio-X utilizando-se de interpretação de escala de cinza para distinção dos grãos de areia e vazios e a respectiva movimentação de cada grão.

Apesar de poucos trabalhos envolvendo o uso da tomografia de raio-X para identificação da microestrutura do solo envolvendo grãos de quartzo, principal constituinte da areia, e solos argilosos, Kawaragi (2009) a utilizou com sucesso para investigar misturas de bentonitas saturadas com grãos de quartzo (0.2–0.8 mm), entretanto, Weber *et al.* (2010) indicou que existe um limitador para a utilização dessa ferramenta para a investigação da zona de transição entre colunas de brita simuladas em centrífuga geotécnica, pois a pequena variação de densidade entre a matriz argilosa e os grãos de areia dificulta a distinção dos constituintes dessa zona.

2.5. Considerações

Tendo em vista a função das colunas granulares como técnica capaz de acelerar o processo de adensamento de solos finos e melhorar as condições de resistência do solo de fundação, é necessária a observância e conhecimento dos fatores que podem afetar o desempenho dessa técnica, também chamados de fatores condicionantes para o desempenho.

Entre os fatores condicionantes para o desempenho das colunas granulares ressalta-se a variação da seção transversal da coluna granular, a ocorrência de colmatações e a ocorrência de rupturas na coluna granular.

Para realizar estudos nesse tipo de obra, que tem dimensões muitas vezes difíceis de simular e analisar em escala real, a técnica de modelagem física é utilizada por tornar estudos desses tipos de situações viáveis e possíveis.

Em modelagens físicas, o uso de técnicas de imagens aliadas a resultados de instrumentação podem ser conclusivos no diagnóstico de problemas que poderiam não ser claramente explicados sem esse tipo de tecnologia. Portanto, dentre diversas técnicas, a tomografia de raio-X se apresenta, comparativamente com outras técnicas, como uma ferramenta que fornece alto nível de detalhes e baixos níveis de perturbações da amostra a ser analisada.

CAPÍTULO 3.

Materiais e Métodos

3.1. Modelagem Física em Centrífuga Geotécnica

Com o objetivo de obter um modelo físico reduzido cujo estado de tensões atuantes na coluna de brita representasse o que ocorre no protótipo, foi utilizada a Centrífuga Geotécnica do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Segundo Saboya *et al.* (2010), a centrífuga geotécnica da UENF possui 3,5m de raio de rotação, com a cesta de acomodação do ensaio que possibilita a realização de modelagens com até 0.9 m (W) × 0.9 m (L) × 1 m (H). Além disso, a centrífuga é capaz de suportar ensaios de até 1 Mg submetidos a 100 vezes a aceleração da gravidade (100g), ou 277rpm.

Foi então idealizado um protótipo composto por um grupo de 6 colunas granulares distribuídas em malha quadrada, que será submetida a uma sobrecarga de 40 kPa, como representado na Figura 20, que será simulado pelo modelo reduzido.

3.1.1. Caracterização do modelo

Para que o modelo reduzido representasse o protótipo, ele foi submetido à uma aceleração de 26,3g e as medidas do modelo foram determinadas segundo as leis de proporção que seguem a Teoria da Semelhança Física proposta por Galileu. Essa proporção visou a utilizar um *container* já disponível no laboratório o que facilitaria a realização dos ensaios. A Tabela 4 apresenta as medidas do modelo reduzido seguido das medidas correspondentes no protótipo.

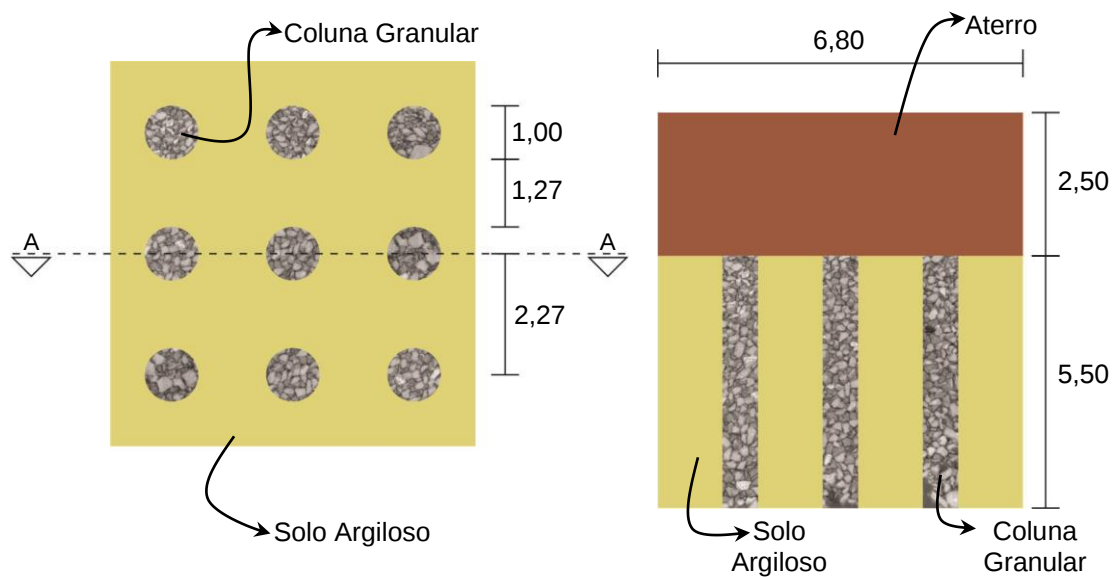


Figura 20: Dimensões do protótipo.

Tabela 4: Relação das medidas do protótipo e do modelo reduzido

	Medida	
	Protótipo (cm)	Modelo Reduzido (cm)
Limite do modelo	680	25,9
Diâmetro da coluna	100	3,8
Altura da coluna	550	20,9
Espaçamento entre colunas	127	4,8
Espaçamento entre colunas externas e o limite do modelo	64	2,4
Altura de aterro	250	9,5

3.1.2. Materiais

Para a realização da modelagem física foi utilizado um container retangular de aço, com um visor frontal de acrílico apresentado nas Figuras 21a e 21b. As medidas internas do container são apresentadas na Figura 21c.

O container foi subdividido formando um compartimento central obsoleto e dois compartimentos com base quadrangular que foram utilizados para a realização de dois ensaios simultaneamente, como apresentado na Figura 22. Nas paredes laterais foram feitos 4 orifícios com válvulas para realizar a comunicação entre as camadas drenantes inferior e superior ao solo, além dos 12 orifícios já existentes que foram utilizados para a inserção dos transdutores de poro-pressão.

Inicialmente a lama que representa o solo argiloso foi preparada com uma mistura de Caulim e Metacaulim. A dosagem adotada neste trabalho foi a de 60% de Metacaulim e 40% de Caulim, mesma dosagem adotada por Melo (2010), que a partir de análises de diferentes misturas, elegeu a que apresentou índice de plasticidade de valor 26,7%, que representa um solo fino.

Essa mistura foi disposta nos dois compartimentos do *container* visto na Figura 22, sobre a camada drenante inferior. Duas folhas de papel filtro foram colocadas entre a camada drenante e a matriz argilosa. O conjunto foi pré-adensado com uma sobrecarga de 7,6 kg, a 1g por 48 horas como é mostrado na Figura 23.

Para monitoramento da poro-pressão na matriz de material fino, foram inseridos, através dos furos laterais do container, três transdutores de poro-pressão P1, P2 e P3 no compartimento 1 e dois transdutores de poro-pressão PP e PS no compartimento 2. A Figura 24 apresenta uma ilustração esquemática da localização final dos transdutores P1, P2, P3, PP e PS e dos furos onde eles foram inseridos e a Figura 25 mostra os transdutores P1, P2 e P3 posicionados no compartimento 2 antes do lançamento da lama de material fino.

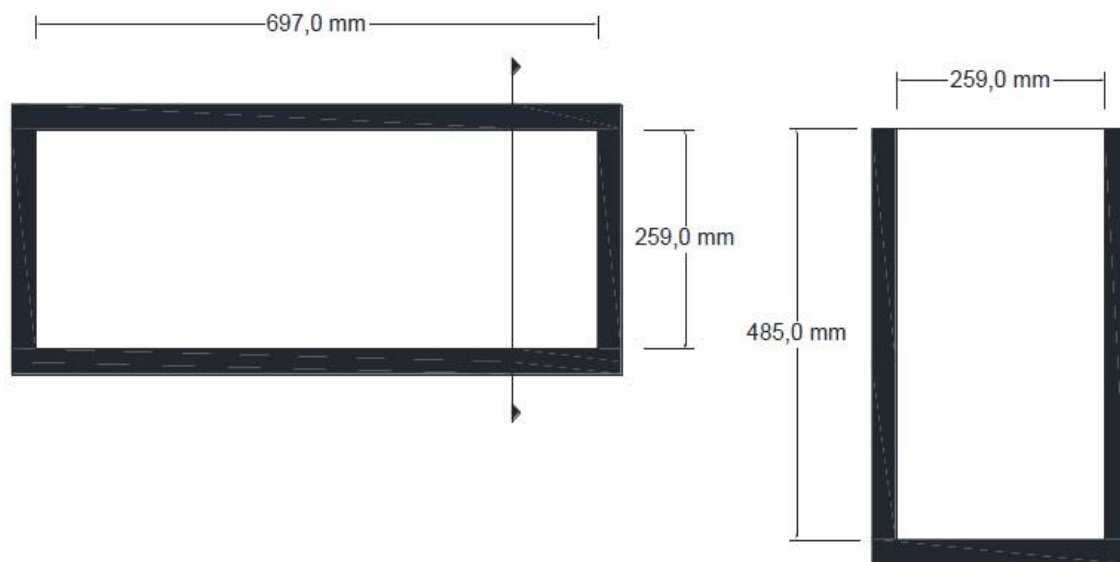
Após o período de pré-adensamento, o material fino foi adensado em centrífuga a 26,3g sob a ação do peso próprio, até que a poro-pressão, monitorada pelos transdutores de poro-pressão, fosse dissipada. Durante o pré-adensamento as válvulas drenantes foram abertas e, após atingir a estabilização da poro-pressão, foram fechadas novamente.



a) Visor frontal;



b) Vista superior;



c) Medidas internas.

Figura 21: Container utilizado nos ensaios em Centrífuga Geotécnica.

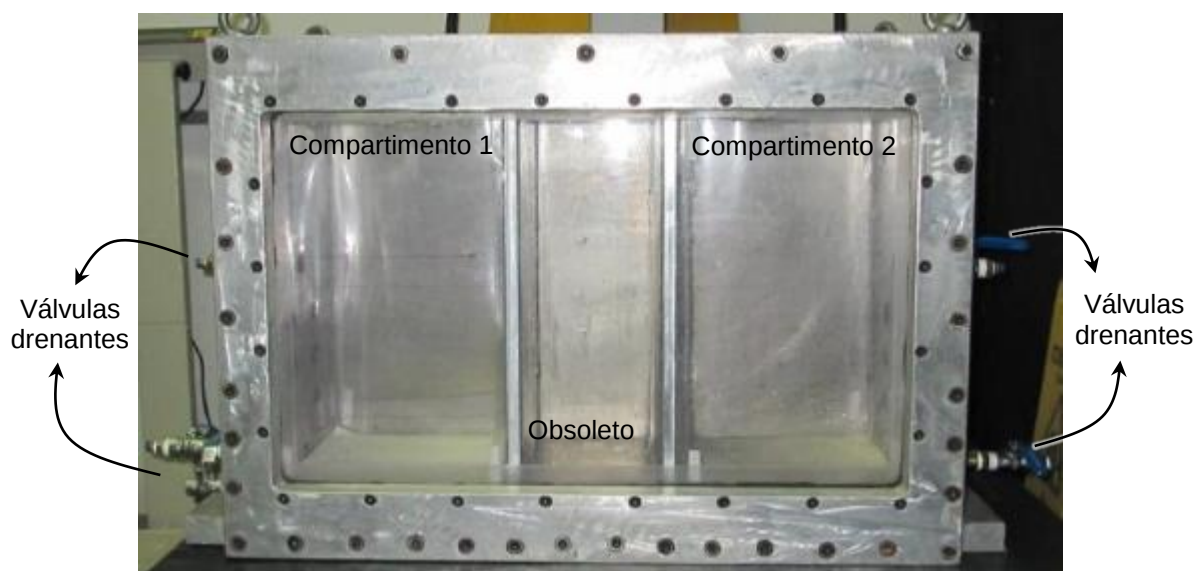


Figura 22: Container com as adaptações para ensaio.



Figura 23: Aplicação de sobrecarga a 1g

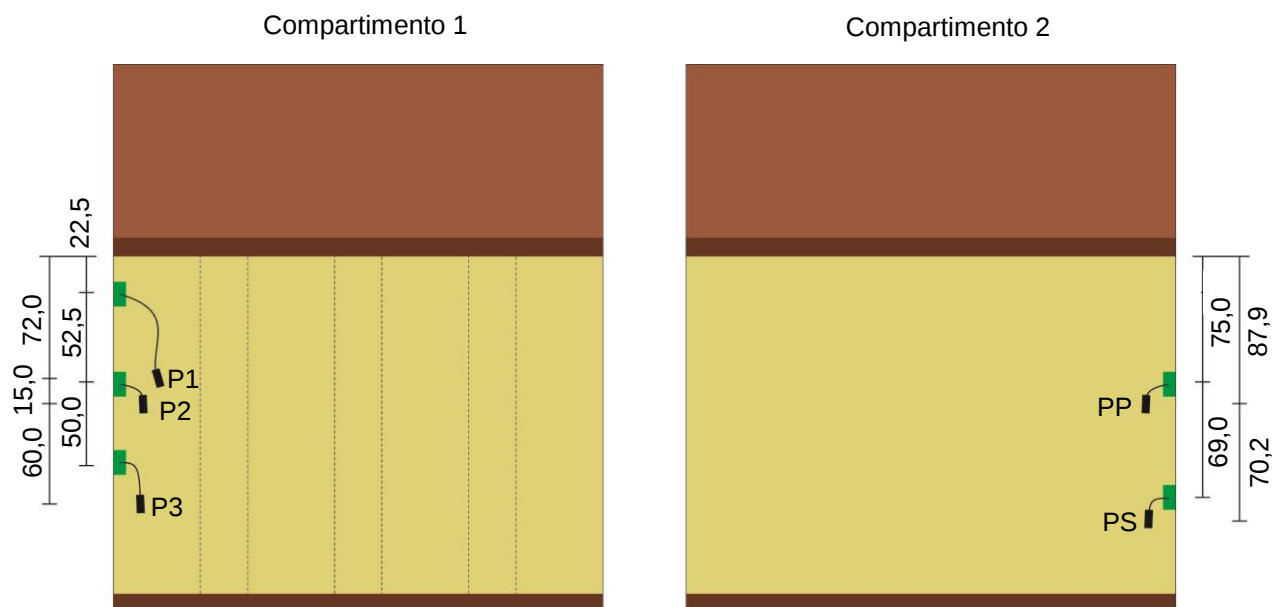


Figura 24: Posicionamento dos transdutores de poro-pressão nos compartimentos do *container* (medidas em mm).

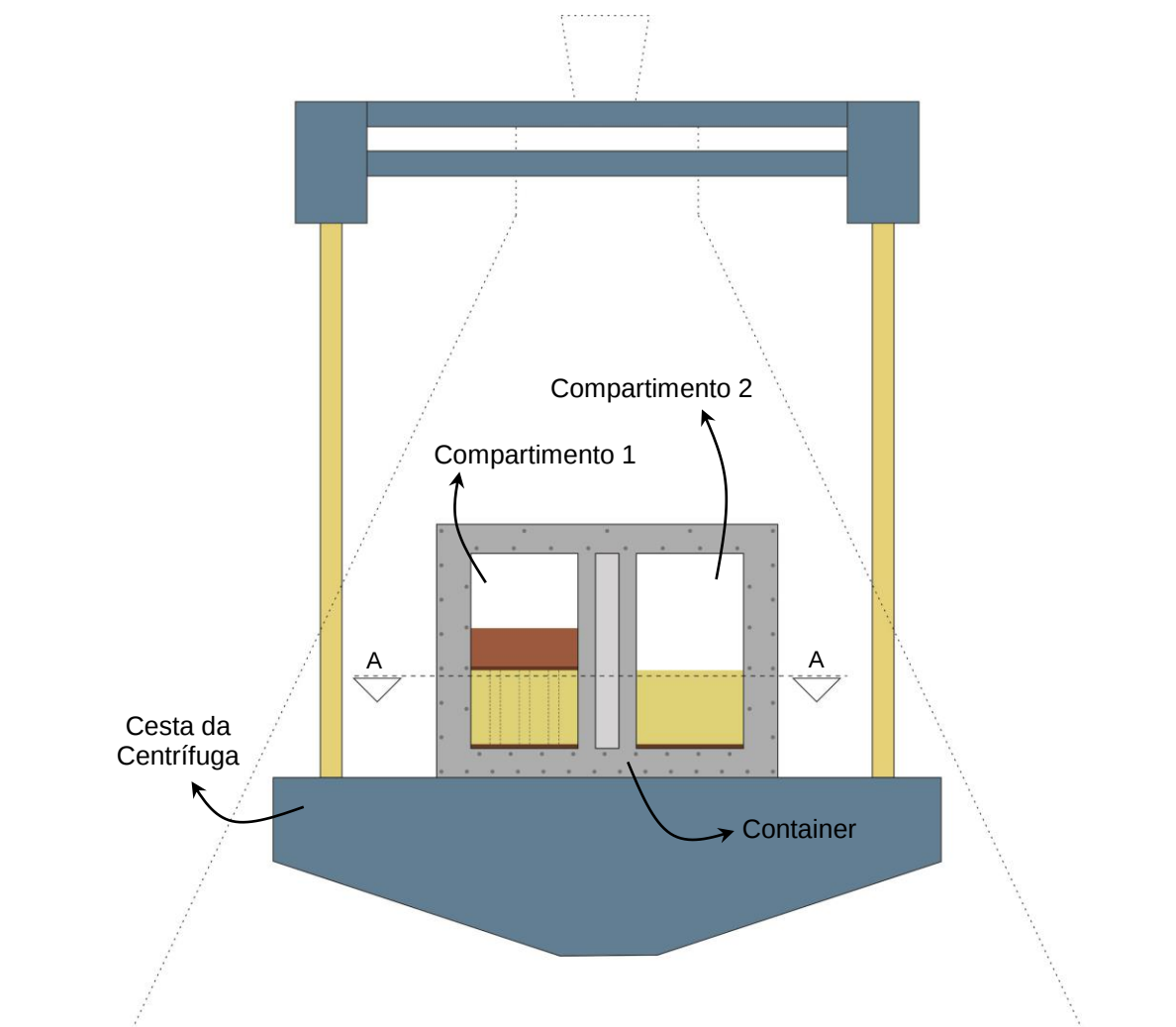


Figura 25: Transdutores de poro-pressão inseridos no container.

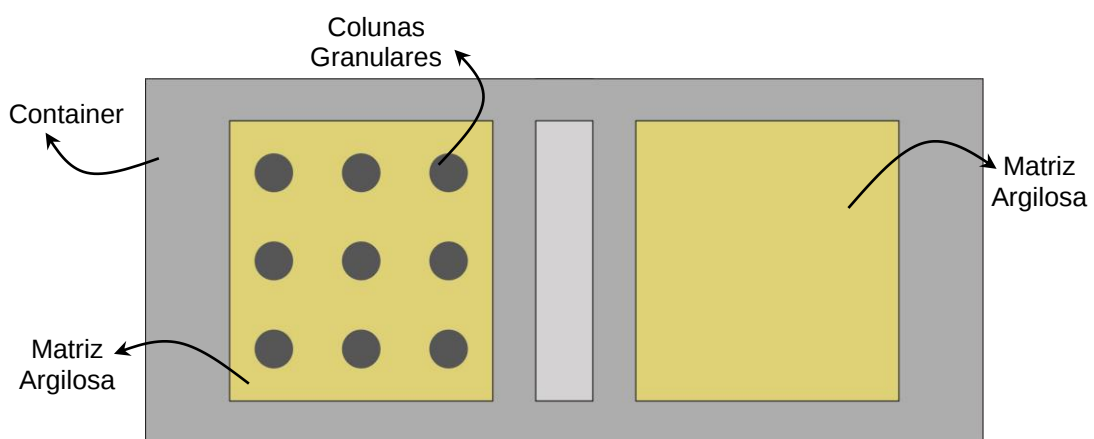
Após o processo de pré-adensamento, foi realizado o ensaio de mini T-bar no compartimento 2 do container em voo para a verificação da resistência não drenada da matriz argilosa pré-adensada.

O procedimento de construção das colunas e sobrecarga a 1g foi realizado somente no compartimento 1, já que o solo do compartimento 2 foi amolgado pela realização dos ensaios de verificação de resistência do solo. A Figura 26 apresenta a montagem do container nessa etapa do ensaio.

Para a construção das colunas granulares foi desenvolvido um sistema composto por uma guia para a construção, pilão e tubo de cravação de parede fina com 38 mm de diâmetro externo e 30 mm de diâmetro interno, fechado com uma ponteira porosa fixada ao tubo com silicone, como apresentado nas Figuras 26a, 26b e 26d. A ponteira porosa é constituída de uma mistura de 94,4 g de areia e 13,3 g de cola branca e foi construída com o auxílio do molde apresentado na Figura 27c. A Figura 28 apresenta as dimensões de cada componente do sistema auxiliar ao processo construtivo das colunas. A areia utilizada para a construção da pedra porosa foi a mesma utilizada nas camadas drenantes cuja granulometria é mostrada na Figura 29.



a) Croqui do container na cesta da centrífuga com os 2 ensaios distintos em vista frontal



b) Croqui do container com os 2 ensaios distintos em planta

Figura 26: Montagem do container para os ensaios em centrífuga.

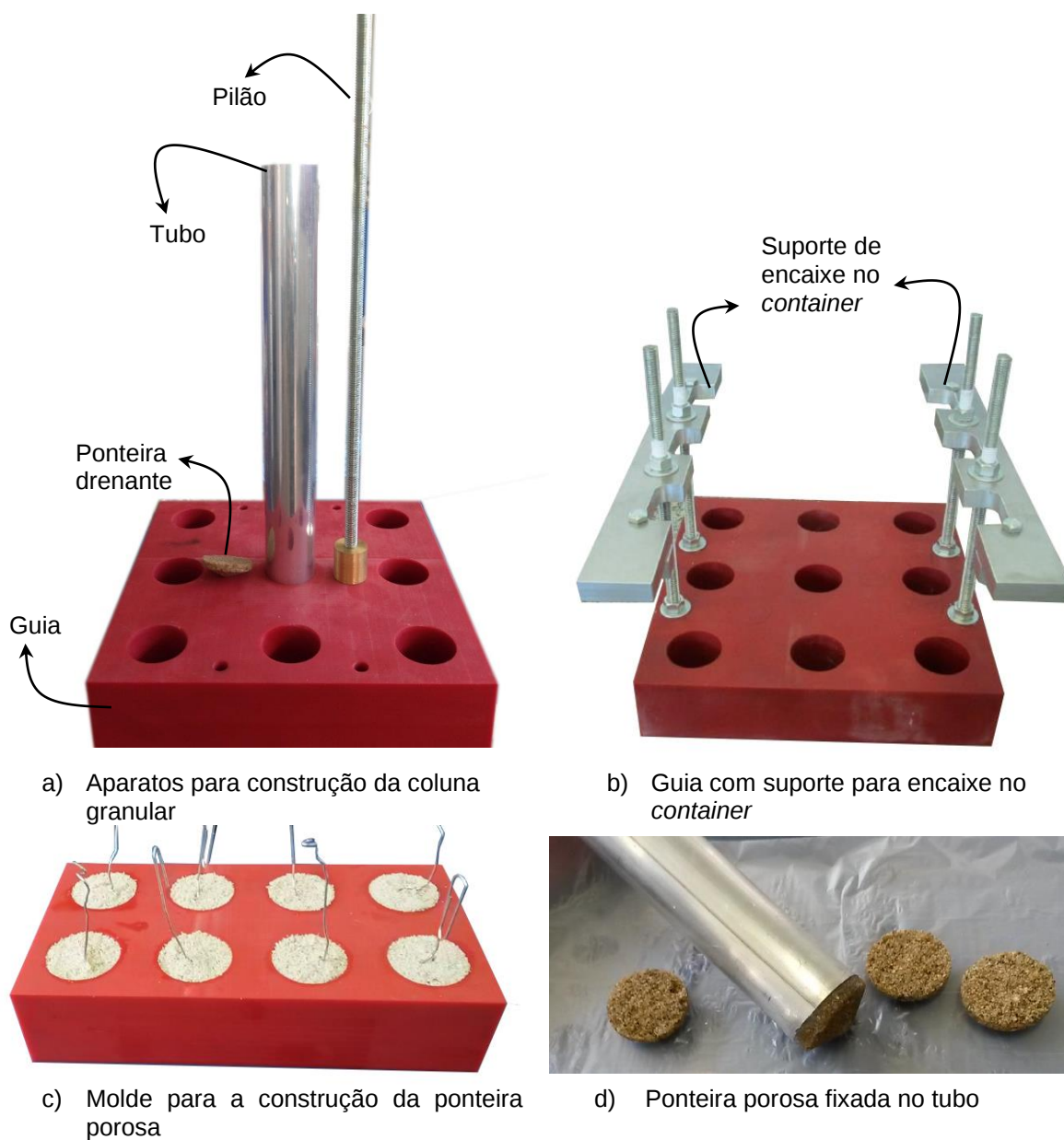
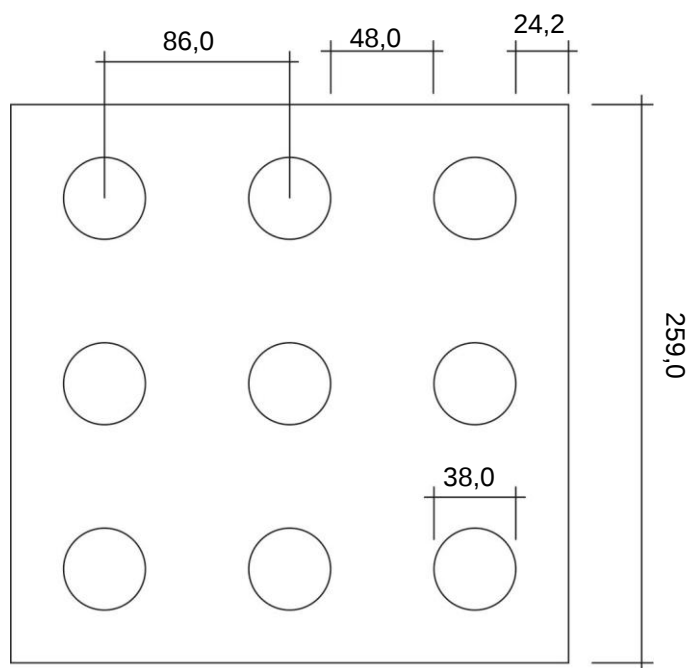
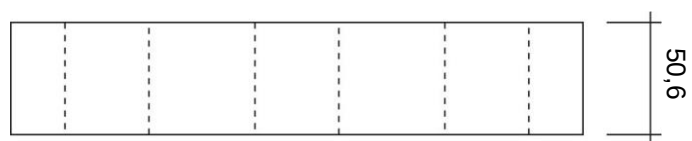


Figura 27: Ferramentas utilizadas no processo construtivo das colunas

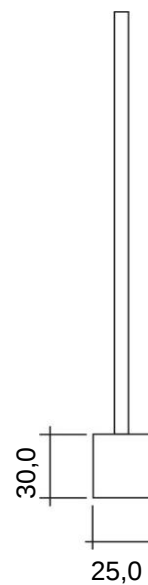


Obs.: Todas as medidas são simétricas em x e y

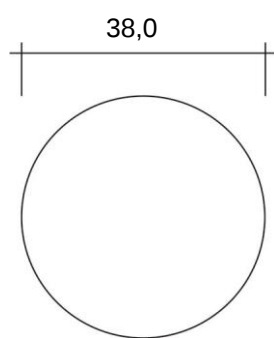
a) Guia em planta



b) Guia em vista



c) Pilão



d) Ponteira em planta



e) Ponteira em vista

Figura 28: Croquis das ferramentas utilizadas no processo construtivo das colunas.
Unidades em mm.

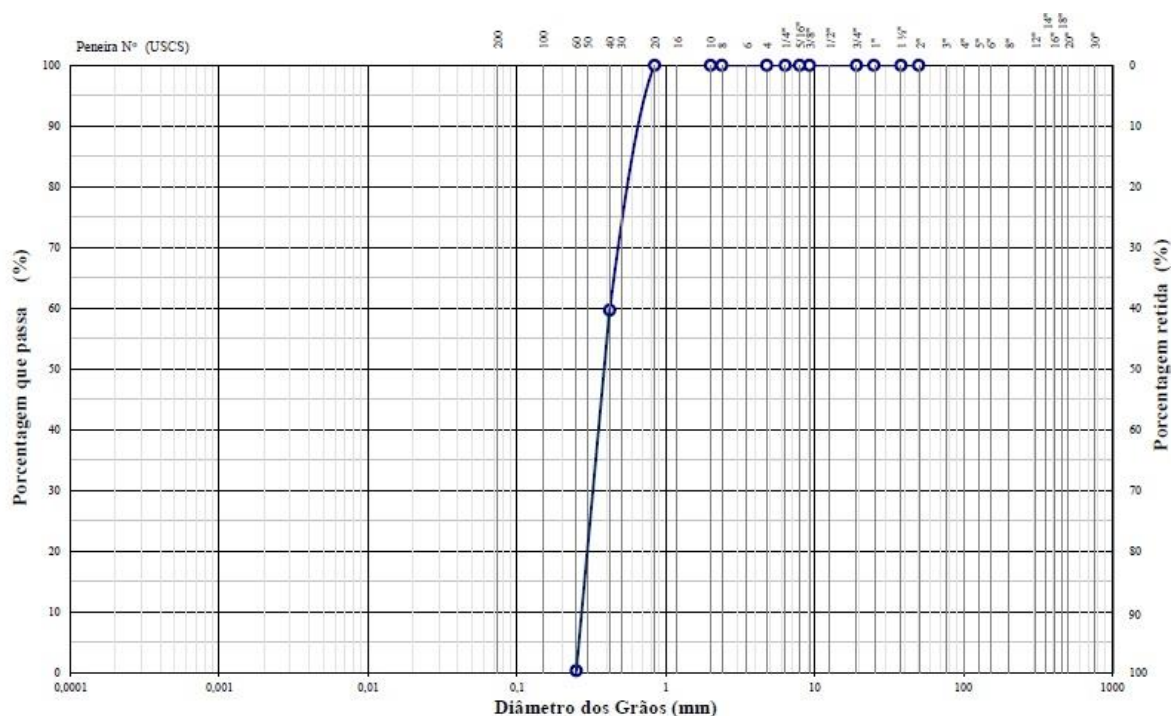


Figura 29: Curva granulométrica da areia utilizada no aterro e nas camadas drenantes (Adaptado de Cardoso, 2010)

Primeiramente foi cravado o tubo com a ponteira no solo, passando pela guia encaixada no topo do container, até que a ponteira drenante tocasse a camada drenante inferior, apresentando resistência para a continuação da cravação. Após isso, foi lançada a primeira camada de material granular, cuja curva granulométrica é apresentada na Figura 30, e depois o tubo foi descolado da ponteira com o auxílio do pilão pressionando a primeira camada, empurrando-a para baixo e puxando levemente o tubo para cima. Como a ponteira foi fixada ao tubo com silicone, foi possível soltá-la facilmente. Após a ponteira estar solta do tubo e a primeira camada apiloada, foi então lançada a camada seguinte, apiloando-a concomitante com a gradativa retirada do tubo até que toda areia colocada estivesse em contato com o solo fino. Foi então repetido o procedimento, até que toda coluna estivesse preenchida.

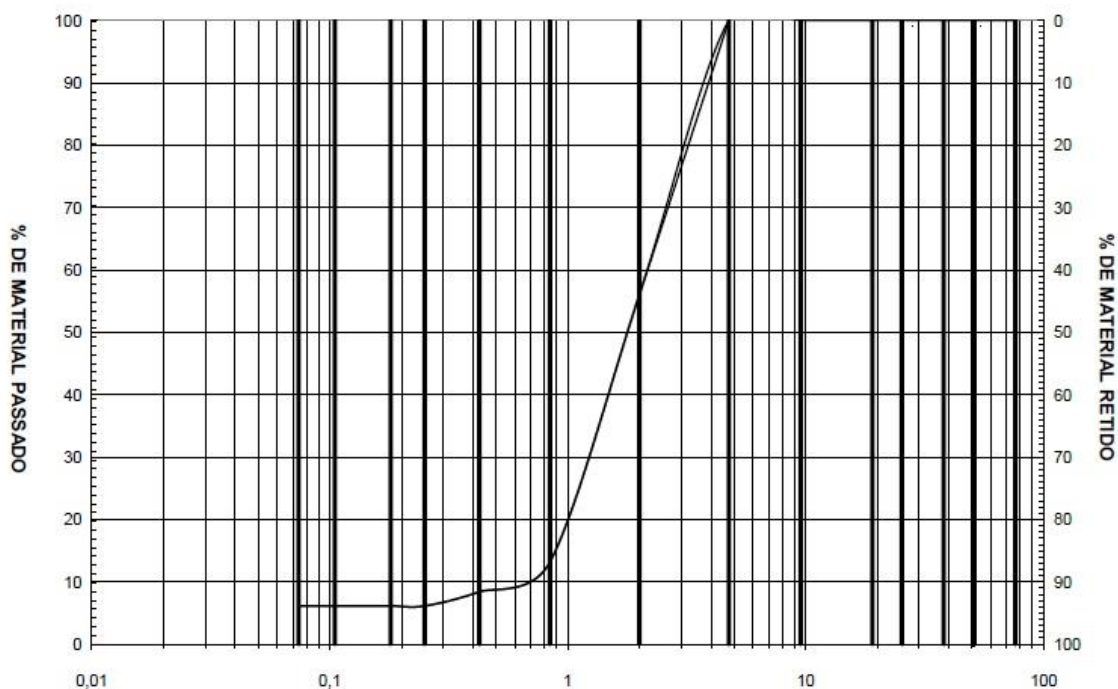


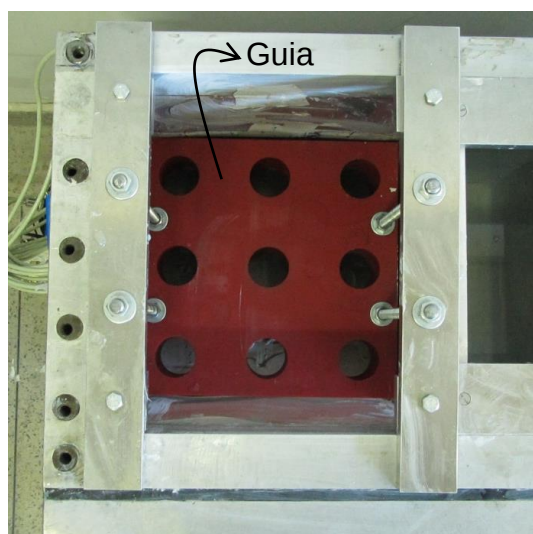
Figura 30: Curva granulométrica da areia utilizada na coluna granular

A quantidade de areia utilizada na construção das colunas foi calculada para seis colunas de 20,9 cm de profundidade e 4 cm de diâmetro, já que há uma expansão do material durante a construção da coluna. O volume de material granular para cada uma das 6 colunas foi separado individualmente em sacos.

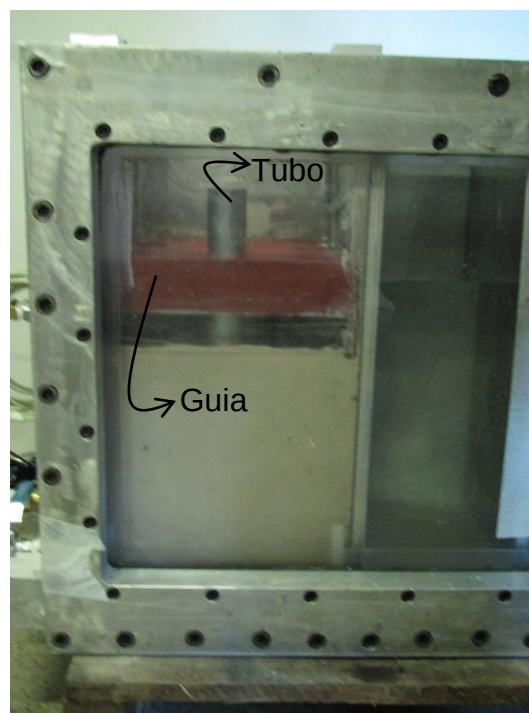
A Figura 31 apresenta fotografias das etapas do processo construtivo das colunas granulares no ensaio, equivalente ao método construtivo de colunas granulares por apiloamento.

Após a construção das colunas, foi realizada a pluviação da areia da camada drenante superior e da sobrecarga sobre três camadas de papel filtro como mostrado na Figura 32. Para isso foi utilizado o pluviador desenvolvido por Cardoso (2010) na UENF apresentado na Figura 33.

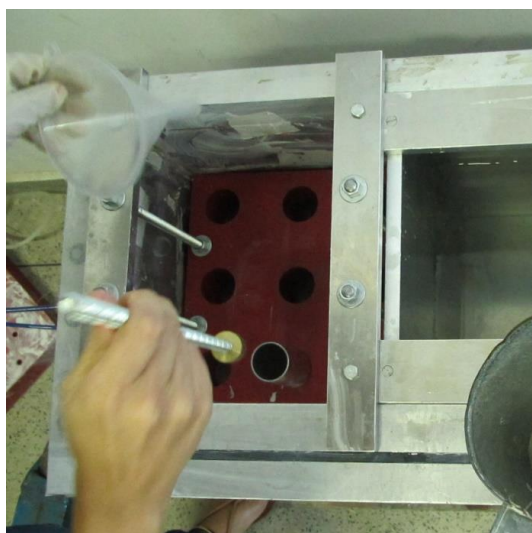
Imediatamente após a pluviação, o conjunto foi levado à centrífuga e submetido a 26,3g para que a atuação da sobrecarga acontecesse sob um estado de tensões semelhante ao observado em um protótipo.



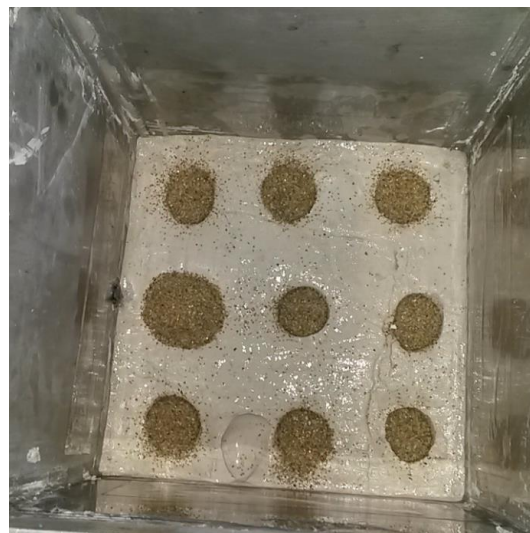
a) Posicionamento da guia



b) Inserção do tubo através da guia



c) Apiloamento do material granular.



d) Disposição final das colunas granulares.

Figura 31: Processo construtivo da coluna granular.



Figura 32: Pluviação do material da camada drenante superior e sobrecarga.

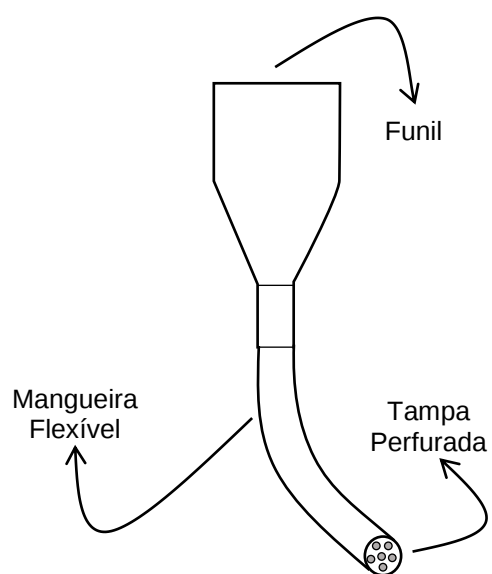


Figura 33: Pluviador desenvolvido na UENF (adaptada de Cardoso, 2010)

Para a obtenção de deslocamentos verticais durante a etapa de aplicação de sobrecarga em voo, foi feito um plano de instrumentação com Sensores *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) de 250 mm de curso útil. No total foram instalados 9 LVDTs, estando 8 deles no modelo reforçado e 1 no modelo sem reforço.

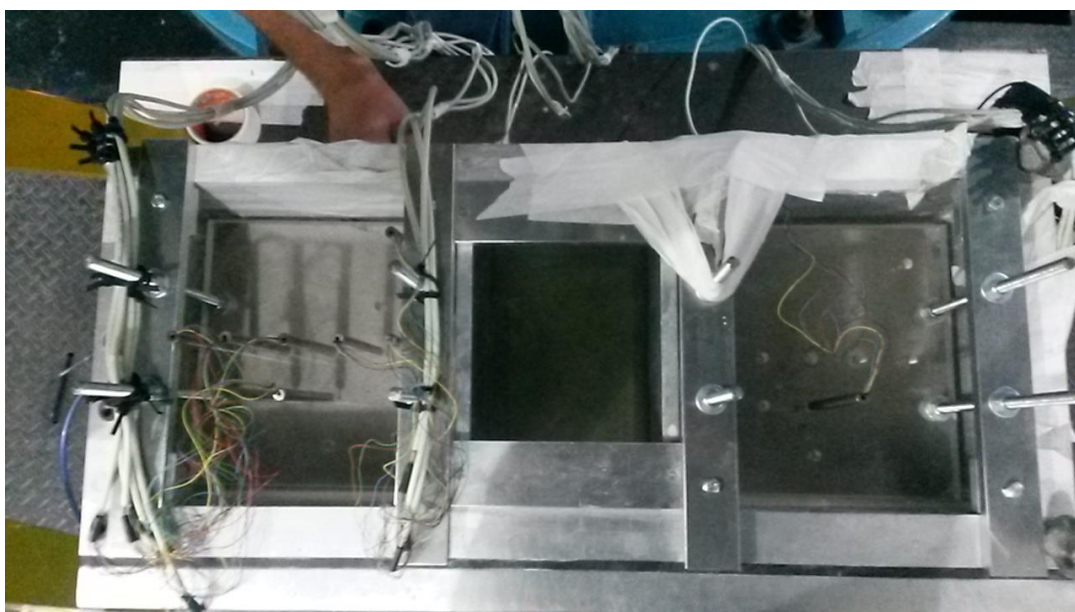
Para garantir a fixação da haste dos LVDTs em voo, foi construído o suporte apresentado na Figura 34, para ficar fixado ao container durante voo.



a) Posicionamento dos LVDTs com referência da guia utilizada na construção das colunas



b) Suporte para os LVDTs



c) LVDTs posicionados para realização do ensaio

Figura 34: Suporte para os LVDTs.

Além dos LVDTs, também foi realizada a instrumentação com transdutores de tensão total (TPC) e transdutores de poro-pressão (PPT) em miniatura, da marca Druck – General Electric Company, modelo PDCR 81, com capacidade de 700 kPa. A Figura 35 apresenta, os transdutores de tensão total instalados. A Figura 36 apresenta a localização da instrumentação em planta e a Figura 37 apresenta um perfil esquemático do posicionamento da instrumentação.



Figura 35: Posicionamento dos transdutores de tensão total.

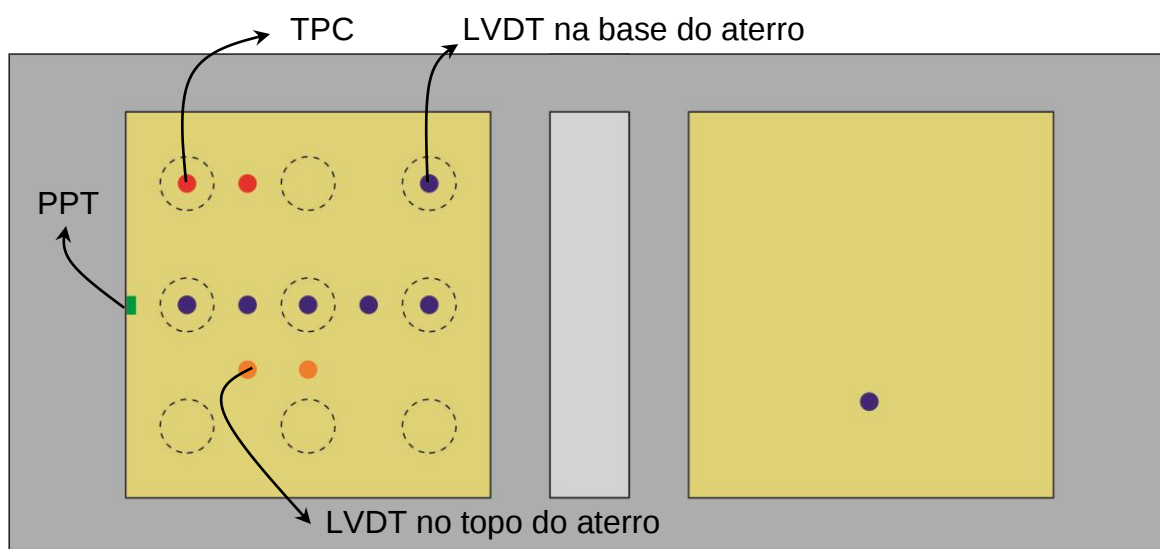


Figura 36: Localização da instrumentação em planta

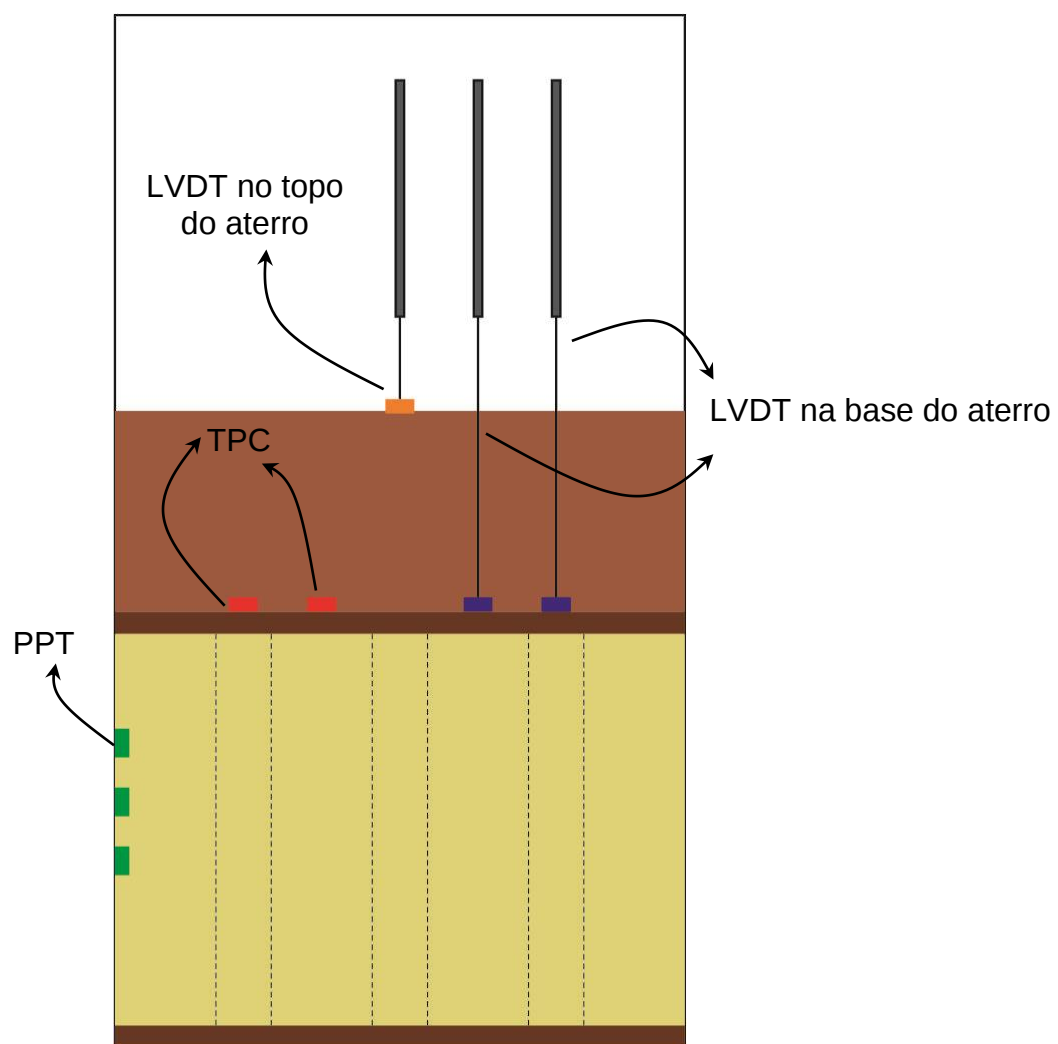


Figura 37: Perfil esquemático do posicionamento da instrumentação

3.2. Tomografia de Raio-X

3.2.1. Processo de Amostragem

Para a coleta das amostras para serem ensaiadas no tomógrafo, foi utilizado um tubo amostrador de PVC de parede fina, com razão de área de 10,2%. As dimensões do tubo amostrador mostrado na Figura 38 foram de 10 cm de altura e 4,79 cm de diâmetro interno. Para realizar a amostragem de toda coluna foi necessário fixar dois tubos. Para isso foi utilizado fita adesiva como mostra a Figura 39.



Figura 38: Tubo amostrador de PVC de *parede fina*

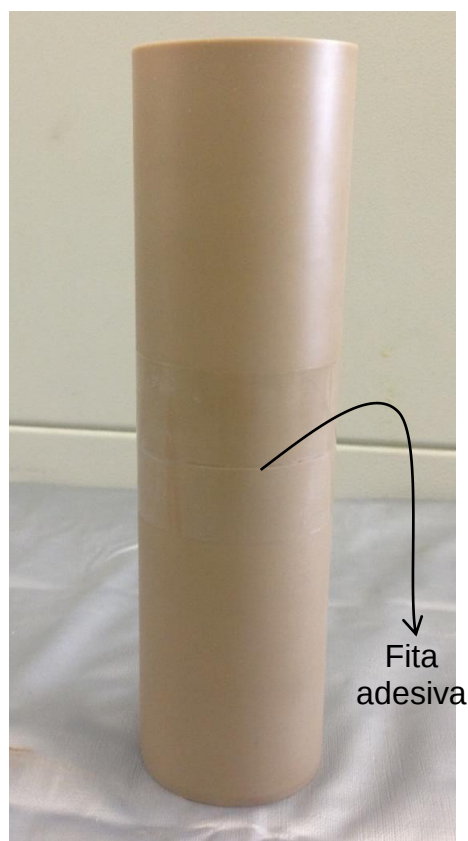


Figura 39: União de dois tubos amostradores com fita adesiva

Não foi necessário extrair da amostra do tubo de PVC, evitando um maior amolgamento da amostra, já que a presença do PVC não impede a refração do raio-X do tomógrafo.

Para o processo de amostragem foi desenvolvido um sistema com cilindro hidráulico para aplicação de carga constante com bomba manual, base para

aplicação de carga, uma guia para garantir sua verticalidade, hastes prolongadoras para aplicação de carga e conectores para ligar a haste ao amostrador, como são apresentados respectivamente nas Figuras 40, 41 e 42.



Figura 40: Macaco hidráulico posicionado para cravação dos amostradores

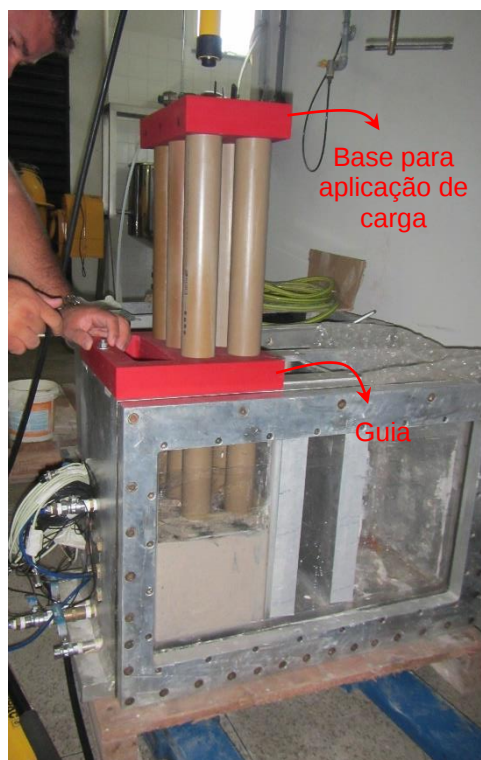


Figura 41: Sistema idealizado para cravação dos amostradores

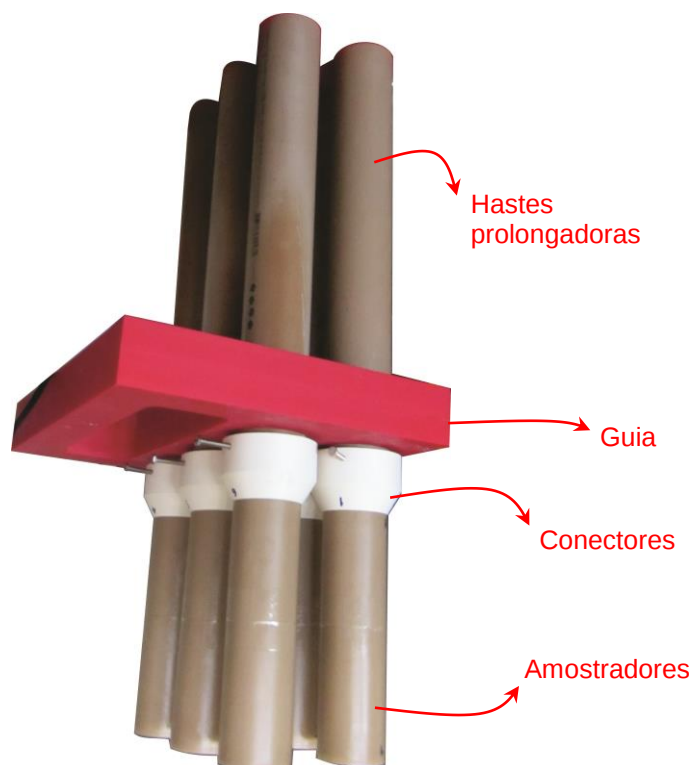


Figura 42: Guia, prolongadores, conectores e amostradores usados no processo de amostragem

Devido à dificuldade de padronização geométrica das colunas e de se manter um alinhamento entre elas, que podem ser observado na Figura 43, a aplicação de carga para cravação do amostrador foi feita manualmente, sobre o prolongador, amostrando cada coluna por vez. A ordem de amostragem é apresentada na Figura 44, onde as colunas numeradas representam as amostradas, os números representam a sequência de amostragem e as ordenadas por letras representam a ordem de simples escavação. Não foi feita a amostragem das colunas representadas por letras pois nessa região foram instaladas algumas das instrumentações do ensaio que ainda se encontravam na matriz argilosa, além de que essa região sofreu amolgamento pela intrusão da instrumentação. A Figura 45 apresenta o posicionamento dos amostradores já cravados.

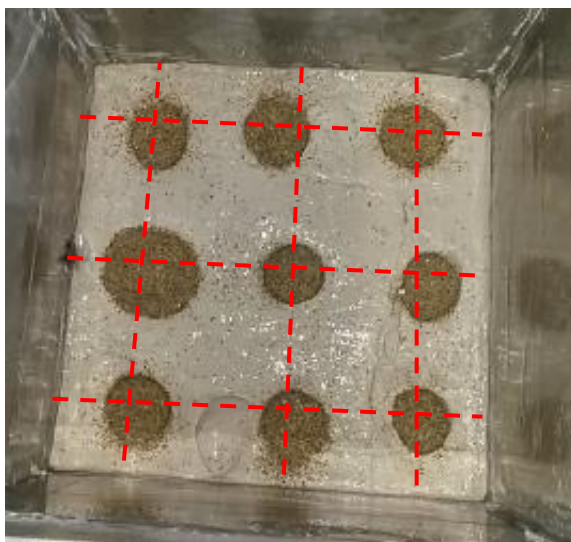


Figura 43: Alinhamento das colunas.

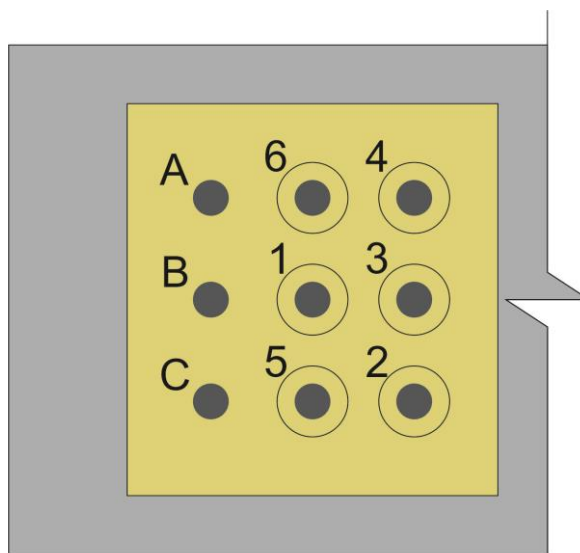


Figura 44: Vista superior da disposição das colunas no container.

Após realizada a cravação dos tubos amostradores foi feita a escavação das colunas localizadas na margem esquerda do container, para dar início a escavação do solo fino no entorno dos amostradores. Para que a umidade existente nas amostras não sofresse evaporação, toda a superfície das amostras foi lacrada com filme de PVC e elástico, como é mostrado na Figura 46.



Figura 45: Amostradores cravados na matriz argilosa.



Figura 46: Prevenção de perda de umidade das amostras com utilização de filme de PVC e elástico.

Quando a escavação do solo fino no entorno do amostrador fosse suficiente para uma remoção delicada, era então introduzida delicadamente uma chapa fina de aço em sua base, e o conjunto era solto da matriz argilosa restante. Esse procedimento é mostrado na Figura 47.



a) Introdução da chapa de aço



b) amostrador retirado do container

Figura 47: Remoção do amostrador do container.

Após retiradas do container, as amostras foram preparadas para serem transportadas e ensaiadas. O procedimento de preparação é ilustrado na Figura 48, seguindo as seguintes etapas: limpeza dos amostradores fixados com fita adesiva, corte da fita adesiva fixadora dos amostradores, introdução de chapa fina de aço entre os amostradores para separação do material amostrado, separação do material amostrado, vedação das amostras individualmente, e armazenamento em caixa plástica, contendo pó de serra umedecido envolvendo cada amostra, com o cuidado das amostras não entrarem em contato entre si e nem com as paredes da caixa.



a) Amostradores limpos.



b) Corte da fita adesiva que prende os amostradores.



c) Introdução da chapa de aço fina para separação do material dos amostradores.



d) Separação dos amostradores.



e) Vedação das amostras com filme de PVC.



f) Armazenamento das amostras.

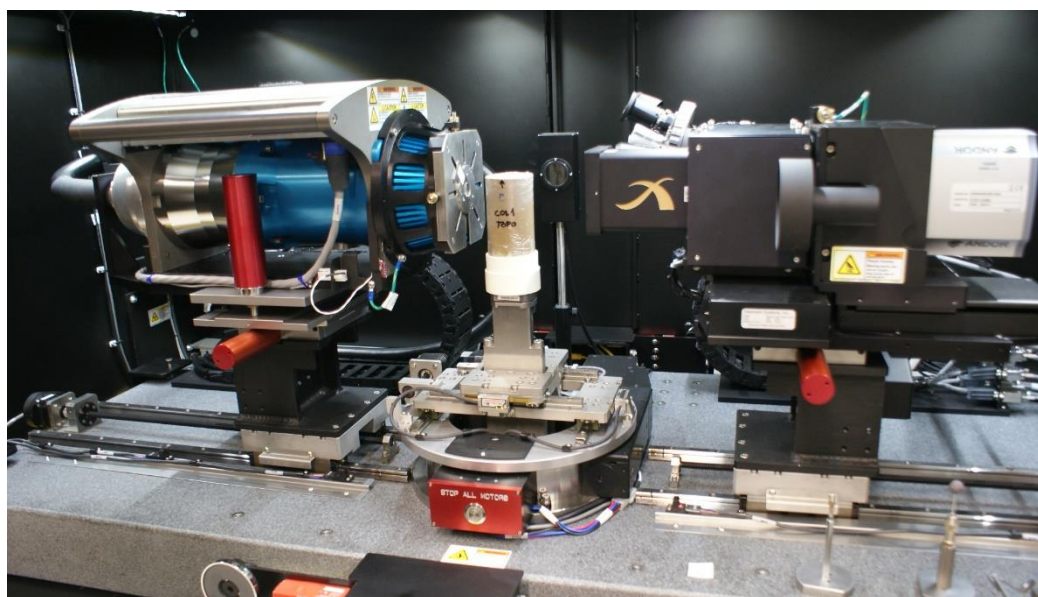
Figura 48: Procedimentos de preparação das amostras para transporte.

3.2.2. Tomografia

O tomógrafo utilizado nas análises foi da marca ZEISS, modelo Xradia 510 Versa, disponível no Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio apresentado na Figura 49.



a) Fotografia do tomógrafo e unidade operacional.



b) Região interna do tomógrafo onde é instalada a amostra.

Figura 49: Tomógrafo de raio-X, modelo Xradia 510 Versa da marca ZEISS.

Para melhor entendimento das etapas dos procedimentos que precedem a obtenção dos resultados, a Figura 50 apresenta um diagrama de fluxo dos processos que ocorrem durante a aquisição das imagens, processamento e interpretação.

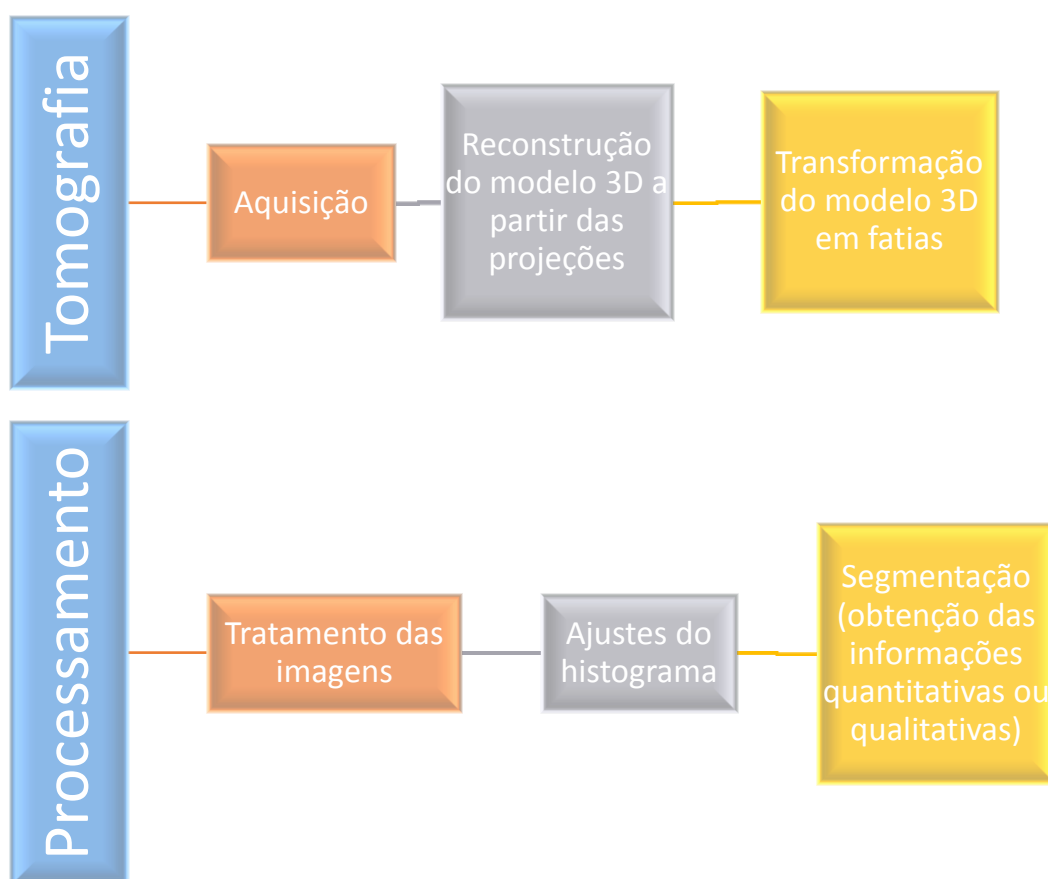


Figura 50: Diagrama de fluxo dos processos que precedem a obtenção dos resultados

A aquisição foi feita através da captação do raio-X que incide no corpo analisado, atravessando todo o corpo para formar projeções verticais. Neste trabalho foi realizada uma projeção a cada $0,257^\circ$, totalizando 1400 projeções verticais. Para isso foi necessário rotacionar horizontalmente a amostra em 360° .

Para que a rotação fosse realizada com qualidade e sem ruídos, foi necessário garantir a imobilidade da amostra durante a aquisição. Foi então elaborada uma peça que encaixasse o amostrador e a base para posicionamento

de amostras do tomógrafo (Figura 51), apresentada na Figura 52. O esquema de montagem do amostrador na base do tomógrafo é apresentado na Figura 53.



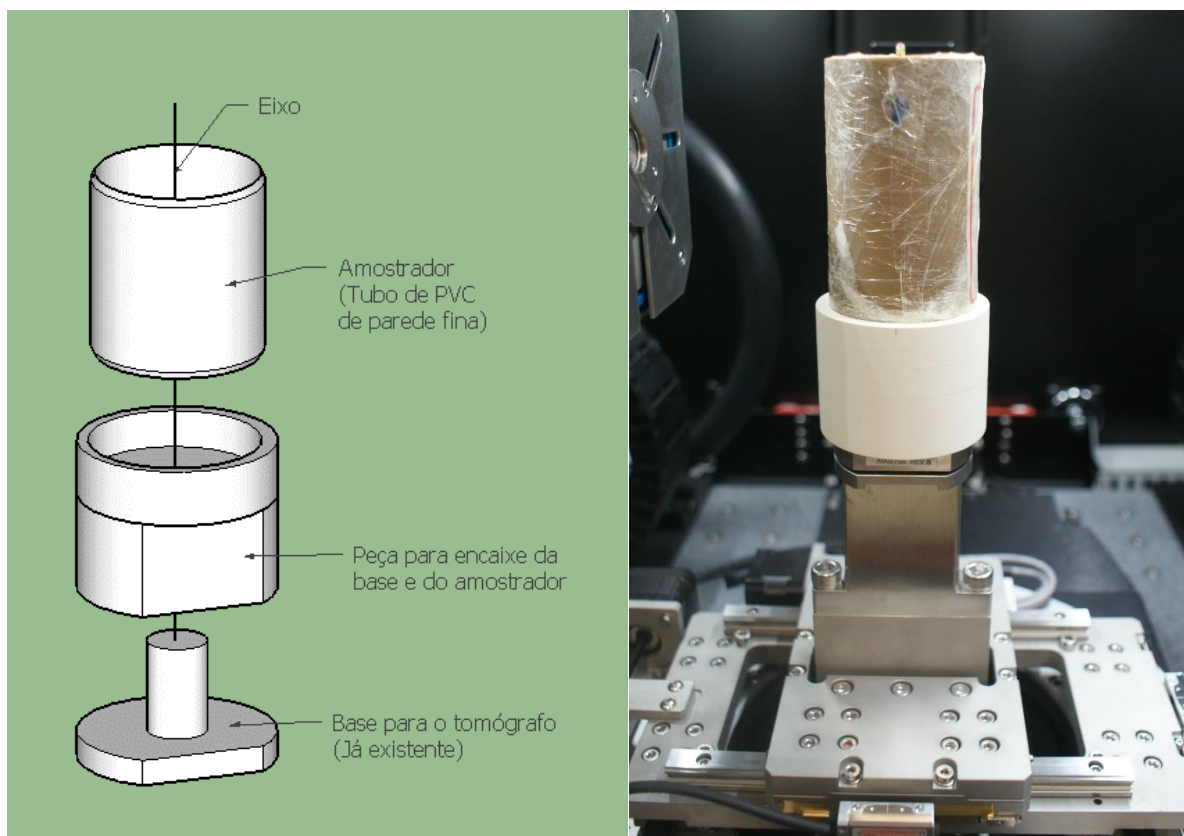
Figura 51: Base de encaixe no tomógrafo.



a) Encaixe para o amostrador

b) Encaixe para a base do tomógrafo

Figura 52: Peça de encaixe do amostrador na base do tomógrafo



a) Croqui esquemático.

b) Amostra devidamente posicionada para realização do ensaio.

Figura 53: Esquema de instalação do amostrador no tomógrafo.

Após realizada a aquisição, é feita a reconstrução do material para formar a imagem em 3D. Nessa etapa foi realizado um ajuste da distribuição de frequências da intensidade de radiação do feixe ainda não convertido em escala de cinza. Após isso foi realizada então a conversão das informações de intensidade de radiação do feixe em imagens em escala de cinza. O resultado dessa transformação foi a geração de seções transversais com resolução de $28,77 \mu\text{m}$ para a amostra “coluna 6 – topo” e de $57,53 \mu\text{m}$ para as demais. A Tabela 5 mostra a quantidade de seções transversais de cada amostra analisada e em quantas etapas foi realizada a aquisição.

Tabela 5: Relação de quantidade de etapas de aquisição e quantidade de seções transversais após a reconstrução referente à cada amostra analisada

Amostra	Quantidade de etapas	Quantidade de seções
Coluna 1 – topo	2	1733
Coluna 1 – base	2	1802
Coluna 6 – topo	2	3151
Coluna 6 – base	3	2218

3.2.3. Processamento Digital de imagens

Gonzalez e Woods (2010) dividem o processamento digital de imagens em duas categorias: A primeira se trata de um conjunto de métodos de tratamento de imagens, cujas entradas e saídas são imagens, como por exemplo a filtragem, realce e restauração de imagens; já a segunda categoria conta com métodos para a extração das informações desejadas existentes nas imagens tratadas, entre esses métodos estão o processamento morfológico e os processos de segmentação, representação e descrição.

Existem diversos softwares no mercado para o tratamento das imagens geradas no tomógrafo. Para as análises quantitativas da coluna granular foi utilizado o *software* CTan da companhia Brucker micro CT para processamento e segmentação das imagens geradas a partir da Tomografia de Raio-X, e para análise visual das características geométricas da amostra foi utilizado o *software* Visual da empresa ORS. Mais detalhes a respeito das ferramentas utilizadas para cada procedimento no *software* CTan são explicitadas no anexo I.

O processamento das imagens obtidas a partir de Tomografias de Raios-X é aplicado nas imagens em escala de cinza formadas a partir da intensidade de raios que incide no fotoconversor. Segundo Burguer e Burge (2009), cada pixel presente na imagem possui uma intensidade de valor e uma frequência de ocorrência. A partir da distribuição de frequências é formado o histograma que é de onde parte o tratamento da imagem.

O início do processo de tratamento acontece em torno da transformação de intensidade dos pixels da imagem para que ela se seja uma imagem de alto

contraste e a distinção entre as fases existentes na imagem seja facilitada. Isso é possível quando se faz a equalização do histograma. A Figura 54 apresenta os tipos básicos de imagem, os respectivos histogramas originais e equalizados, seguidos das imagens equalizadas.

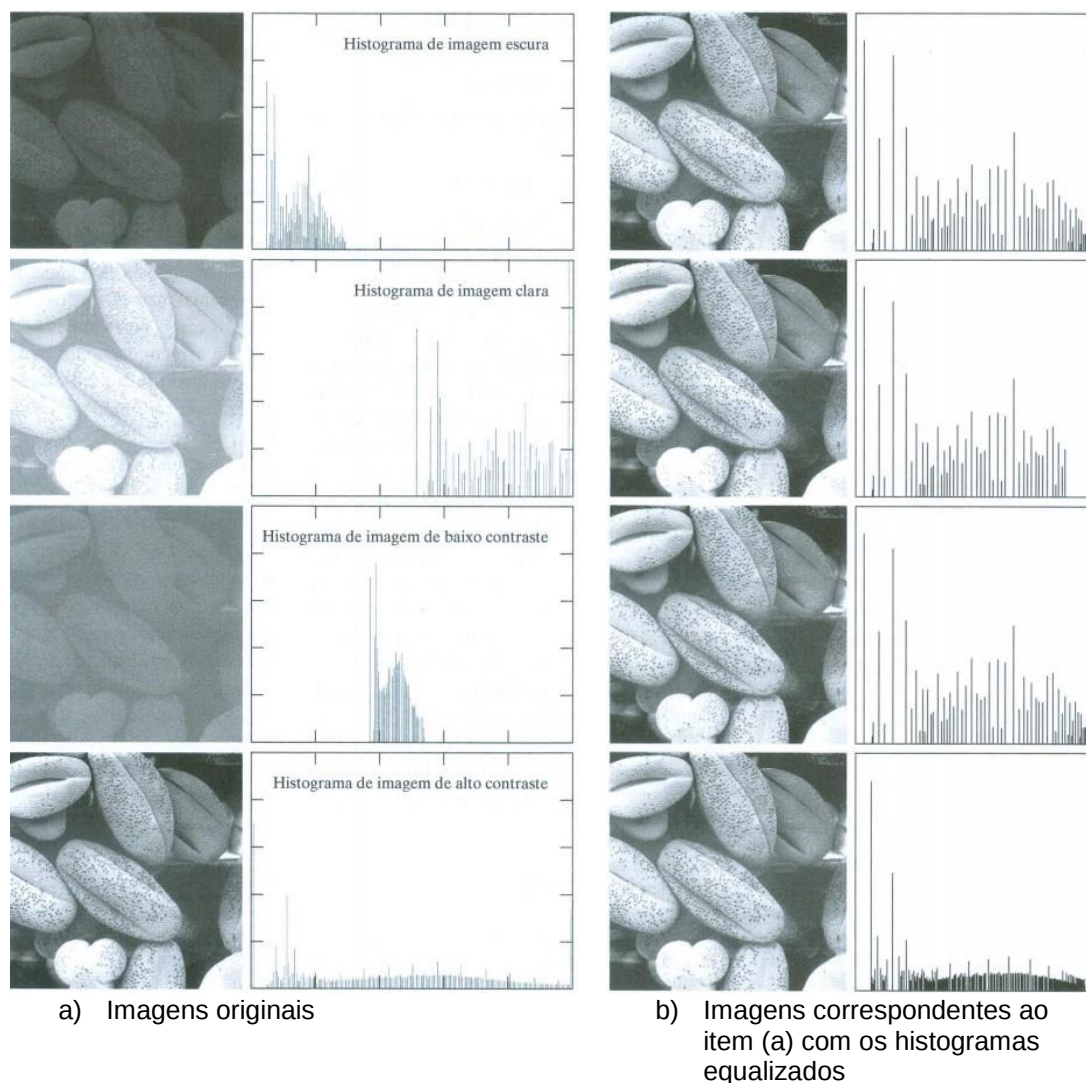


Figura 54: Efeito da equalização do histograma (adaptada de Gonzalez e Woods, 2010)

Após realizados os ajustes relacionados ao histograma, foi então realizada a segmentação, processo onde são quantificados atributos da imagem analisada. Como a escala de cinza varia com a densidade volumétrica do material, a distinção dos diferentes materiais foi feita através da separação do histograma em 3 regiões.

Durante esse processo foi necessário sanar algumas dúvidas referentes à existência de algumas regiões com a densidade muito próxima à do solo fino na região central da coluna granular e a presença de alguns grãos com grande absorção de raios-X. Para isso foram realizados ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), além de investigações com Eletronic Data System (EDS) para identificação da composição dos materiais envolvidos.

Foi determinado que as correlações entre os valores de porosidade obtidos por processamento de imagens de tomografia de raio-X e os resultados de ensaios de condutividade hidráulica nas amostras seriam realizados somente nas amostras superiores. Essa restrição foi definida após analisados resultados das análises morfológicas que mostraram regiões colmatadas no contato entre a amostra inferior da coluna granular e camada drenante inferior.

CAPÍTULO 4.

Apresentação e discussão dos resultados

As fatias transversais da amostra obtidas da tomografia são disponibilizadas como imagens individuais em formato .tif como mostra a Figura 55. O processamento realizado tanto no *software CTan* quanto no *ORS Visual* é feito em apenas uma fatia onde seja possível visualizar todos os materiais de interesse e estimar a rotina a ser aplicada às demais. Isso é feito com o intuito de acelerar o processo, já ajustar as etapas do processamento fazendo testes em todo o material analisado seria muito mais laborioso.



Figura 55: imagens das fatias obtidas pela tomografia

Na fase inicial do processamento, foi utilizado o *software ORS Visual* para reconhecimento dos materiais que compõem a amostra. A Figura 56 mostra o *layout* do *software* destacando as informações importantes durante o processamento.

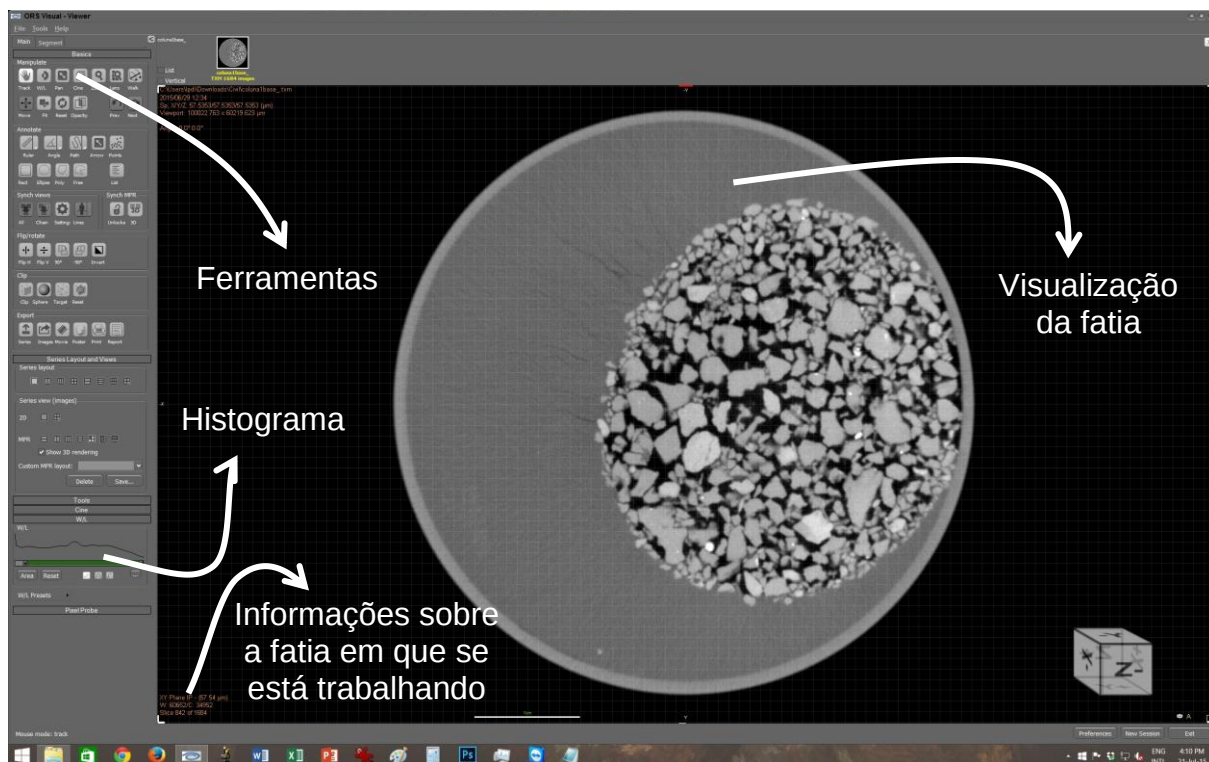


Figura 56: *Layout* do *software ORS visual*

A Figura 57 apresenta uma seção transversal resultada da tomografia. As seções transversais são geradas em tons de cinza do histograma que variam em função da densidade dos materiais envolvidos na análise.

O valor do tom de cinza de cada pixel é obtido em função da densidade média da região abrangida por este. Sendo assim, o valor representado pelos solos finos é a densidade média entre vazios e argilominerais, já que o tamanho médio das partículas desse mineral é menor que o tamanho do pixel da resolução das imagens. Já os grãos de areia das colunas granulares são maiores que os pixels das imagens, sendo, portanto, a densidade dessa região equivalente à densidade dos minerais constituintes dos grãos de areia (i.e., quartzo e feldspato), a não ser nas regiões de borda. Nessas regiões a

densidade média dos pixels é uma média entre as densidades dos vazios e a densidade real dos grãos.

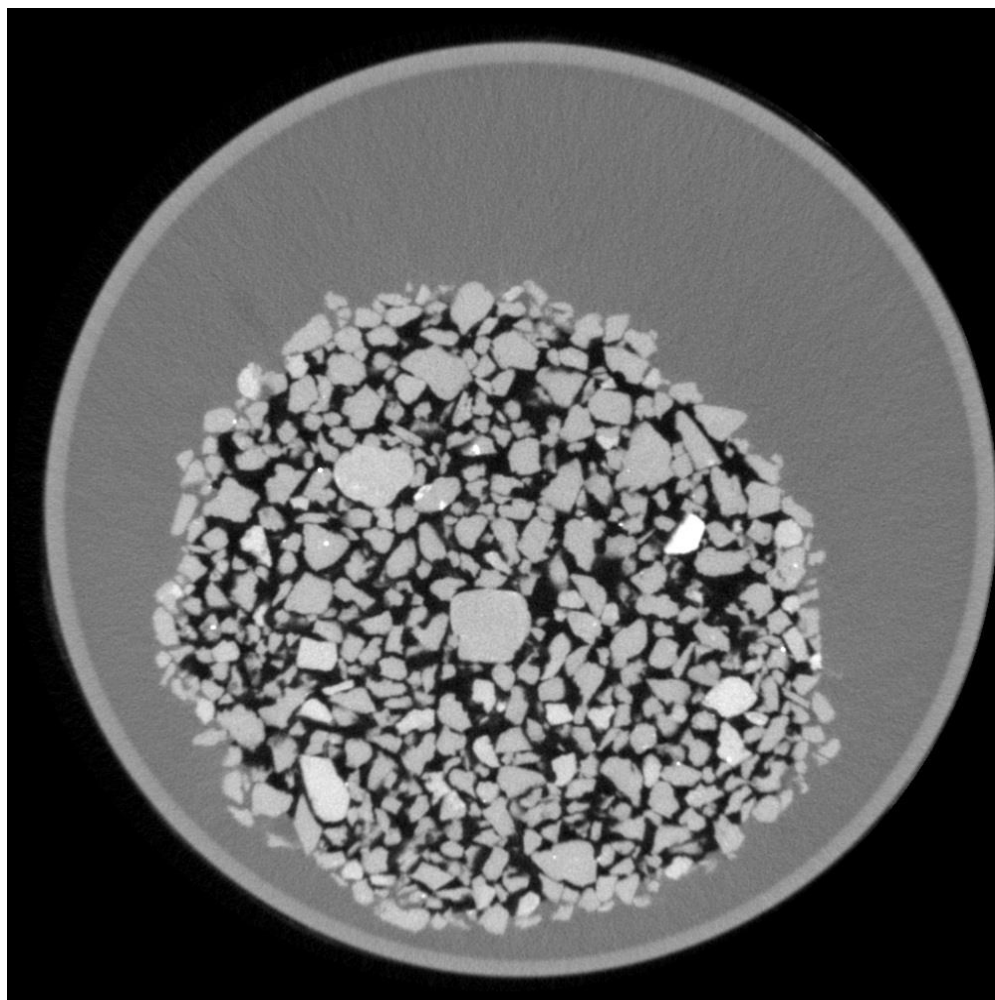


Figura 57: Seção transversal sem processamento

Durante a definição das regiões de interesse foi proposto dividir o histograma em 3 regiões. A menos densa representando os vazios, a de densidade intermediária representando o material composto por minerais argilosos e as regiões com densidade maior representando os grãos de areia usados na modelagem. A Figura 58 apresenta a separação dessas regiões delimitadas em função dos valores do histograma, onde a cor azul representa as

regiões de vazios, a cor verde representa a matriz argilosa e a cor vermelha representa os grãos de areia.

Nessa etapa do processamento surgiram dúvidas a respeito da região de densidade intermediária. Colocou-se em questão se o material que estava ocluindo os vazios da região fronteira da coluna, como também na área externa à coluna granular, era o mesmo presente na região central envolvendo os grãos de areia.

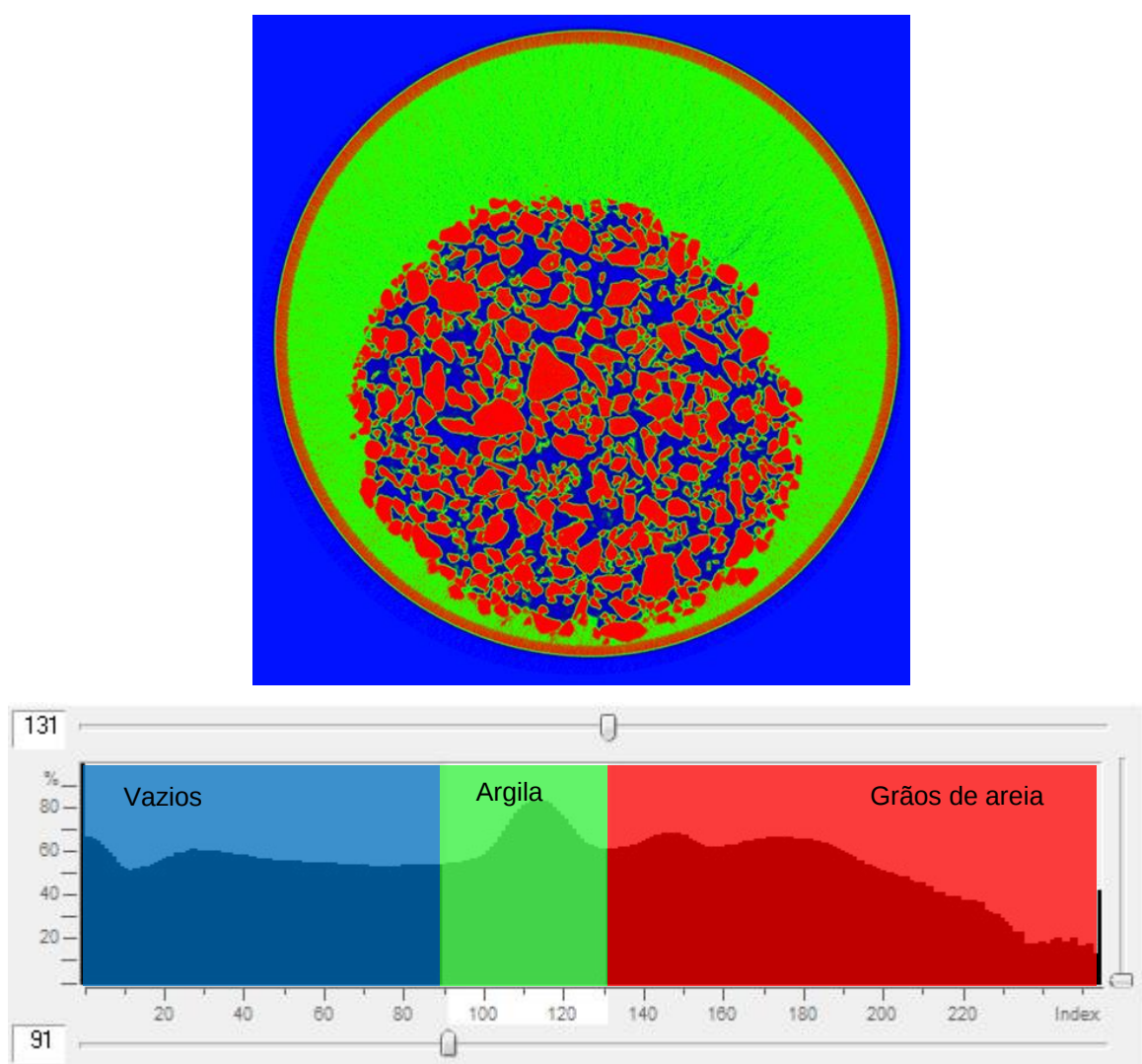
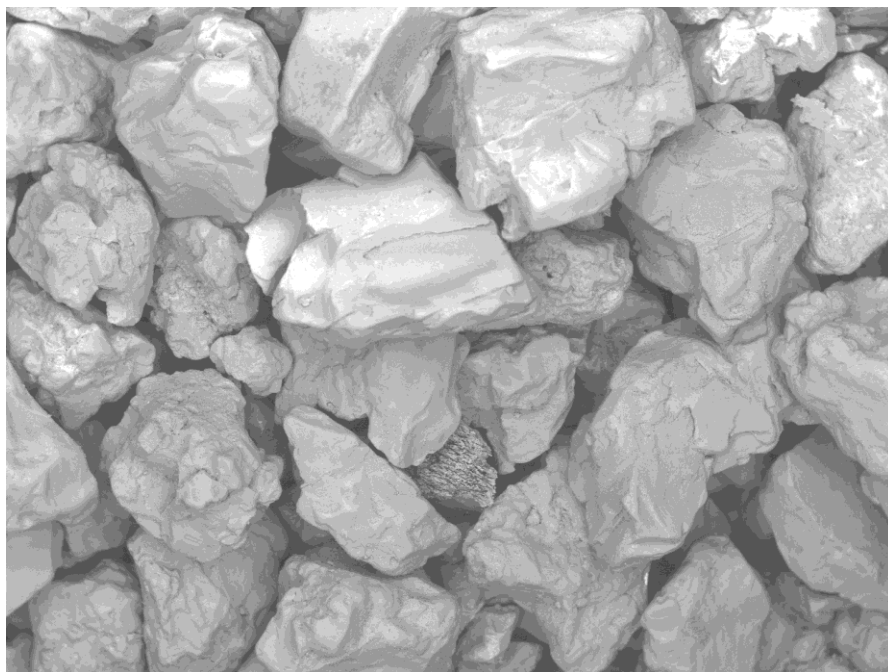


Figura 58: Identificação dos materiais.

Para sanar dúvidas referentes à essa questão identificou-se, através de microscopia eletrônica de varredura, que os grãos de areia presentes na região

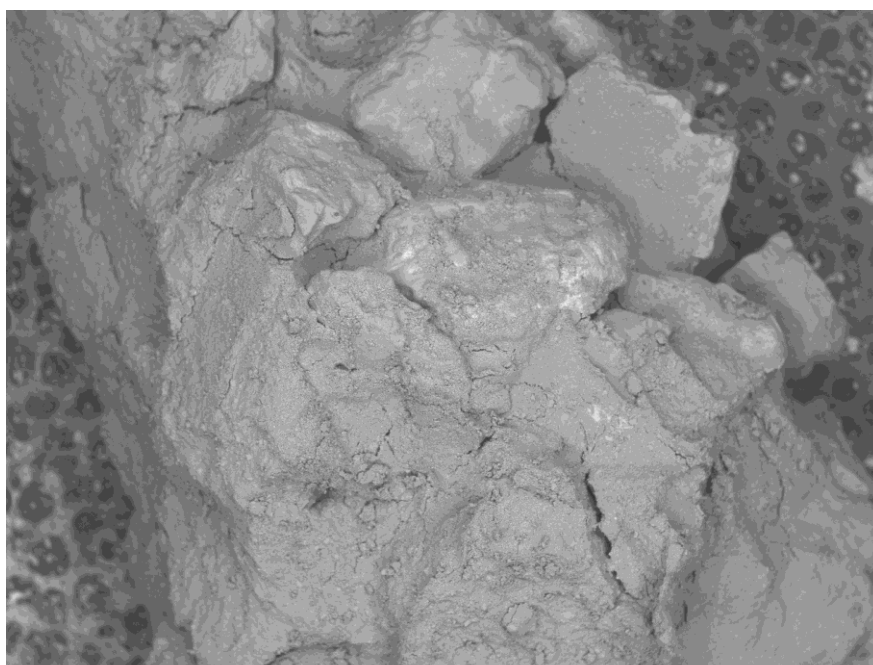
central da coluna não continham partículas finas aderidas à sua superfície, conforme mostra a Figura 59a. Por outro lado, verificou-se que os vazios nas regiões periféricas continham material argiloso como é evidenciado na Figura 59b.



C6-Topo-0003

A D9.8 x30 2 mm

a) Grãos da região central da coluna



ArgilaArei0001

A D8.5 x30 2 mm

b) Grãos da periferia da coluna

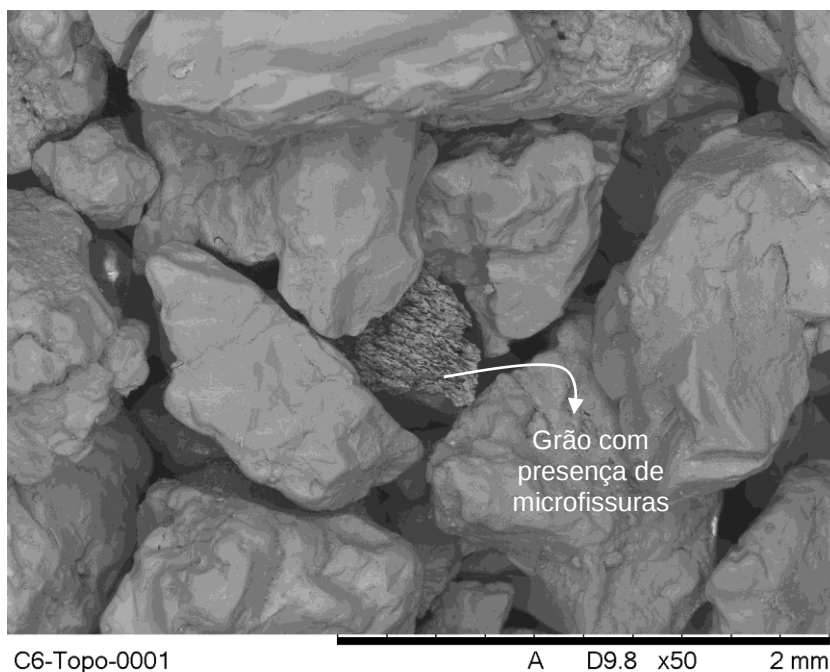
Figura 59: Contaminação dos grãos de areia por material argiloso.

A ocorrência de material com densidade próxima do solo fino na região central da coluna pode ser explicada pela existência de grãos como o apresentado na Figura 60. Nesse caso é possível observar que existe a presença de um grão de quartzo altamente fraturado, que reduz a absorção de raios-X nessa região, fazendo com que sua presença seja confundida com a presença de solo fino. Outro fator que pode explicar isso também é a suavização das bordas devido à densidade média dos pixels localizados na borda.

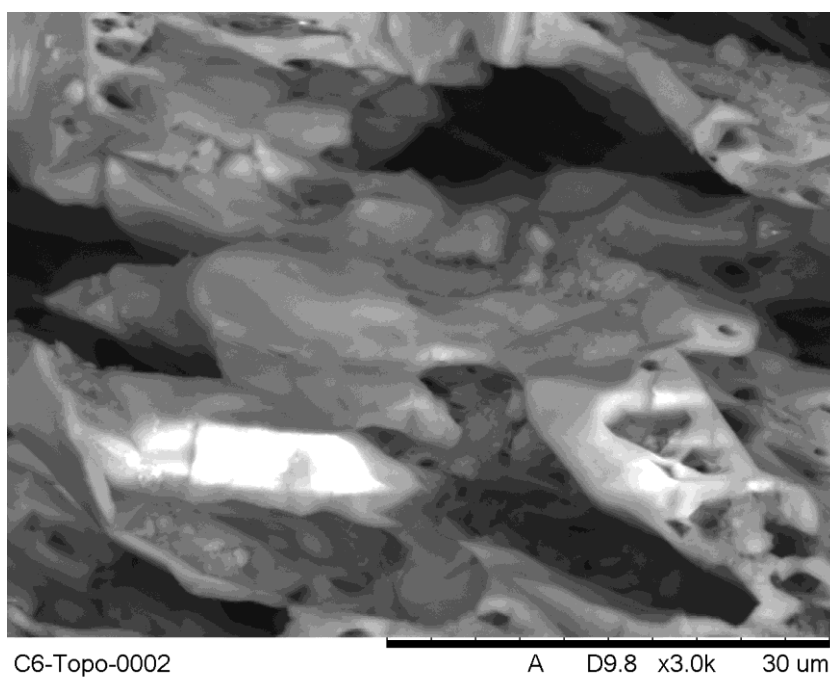
Outra dúvida a respeito dos grãos de areia foi quanto a presença de grãos com densidade muito maior do que os grãos de quartzo, como mostrado na Figura 61.

Esse fato é explicado pela presença de grãos com metais na sua constituição. Na Figura 62 observam-se dois grãos presentes no material granular, de composição química distintas da composição química do grão de quartzo e distintas entre si. Os resultados das análises dos componentes químicos presentes nos grãos analisados realizadas através de EDS são apresentados na Figura 63, mostrando que o grão apresentado na Figura 62a possui grande concentração de Zircônio (Zr) e o grão apresentado na Figura 62b possui grande concentração de Ferro (Fe), além de outros metais em concentração menos representativa. Comparando-se os elementos químicos presentes nesses grãos com os componentes químicos do grão de quartzo apresentado na Figura 62c, que é um silicato cuja composição química é do dióxido de silício (SiO_2) é possível justificar o fato de haver alguns grãos que absorvem mais raios-X do que outros.

Sanadas as dúvidas a respeito dessas questões foi dada a continuação no processamento definindo os valores de tons de cinza correspondentes à areia, à matriz de textura fina e aos vazios. Os valores limites do histograma são apresentados na Tabela 6.



- a) Distinção de grãos de quartzo com e sem presença de microfissuras;



- b) Aproximação do grão de quartzo com presença de microfissuras

Figura 60: Identificação de grão de quartzo com mais fissuras do que os demais.

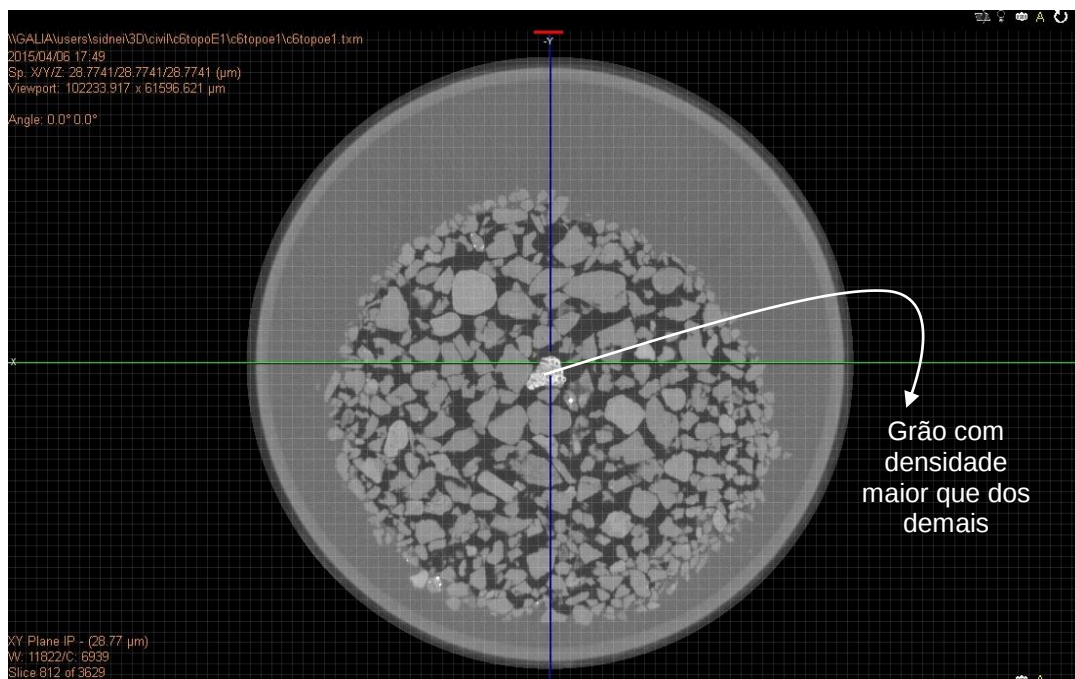
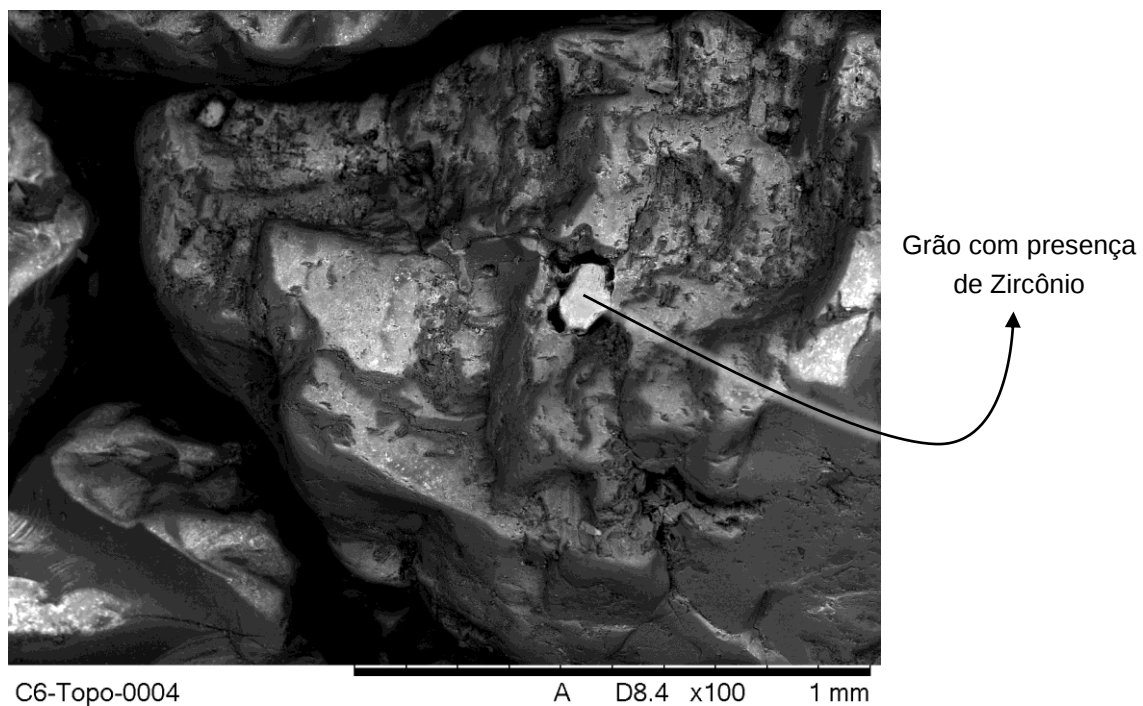
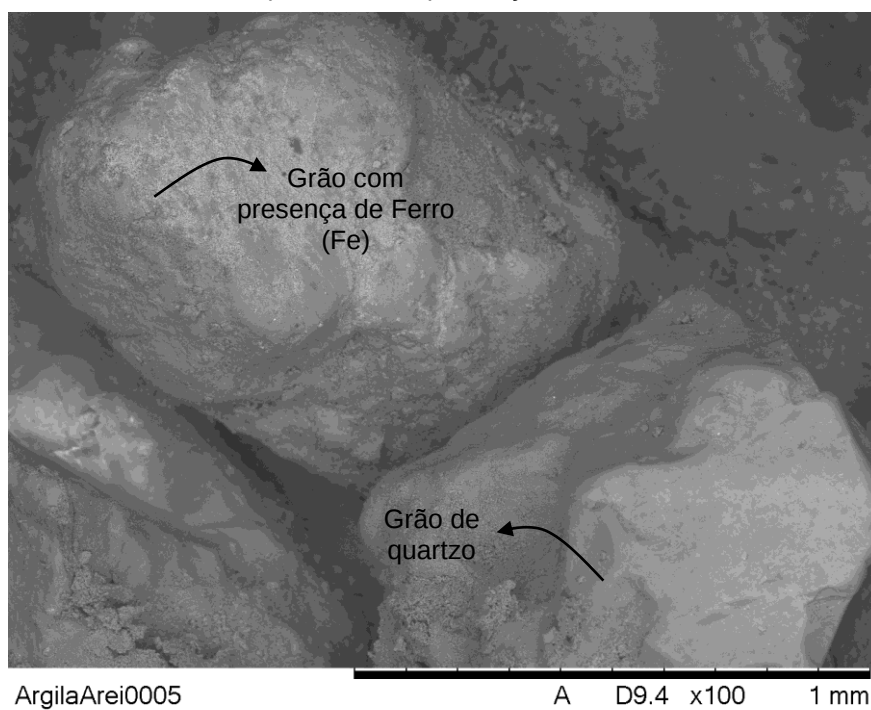


Figura 61: Identificação de grãos com presença de metais

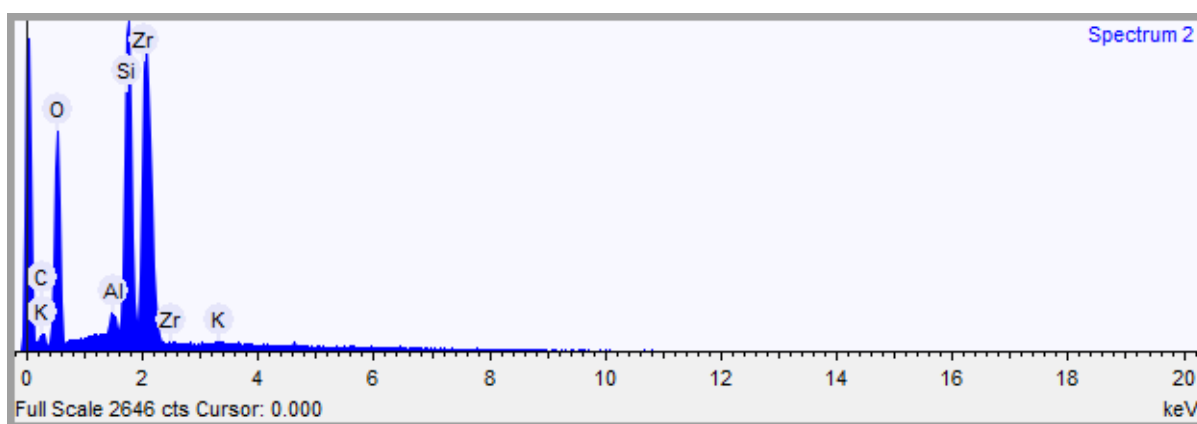


a) Grão com presença de Zircônio;

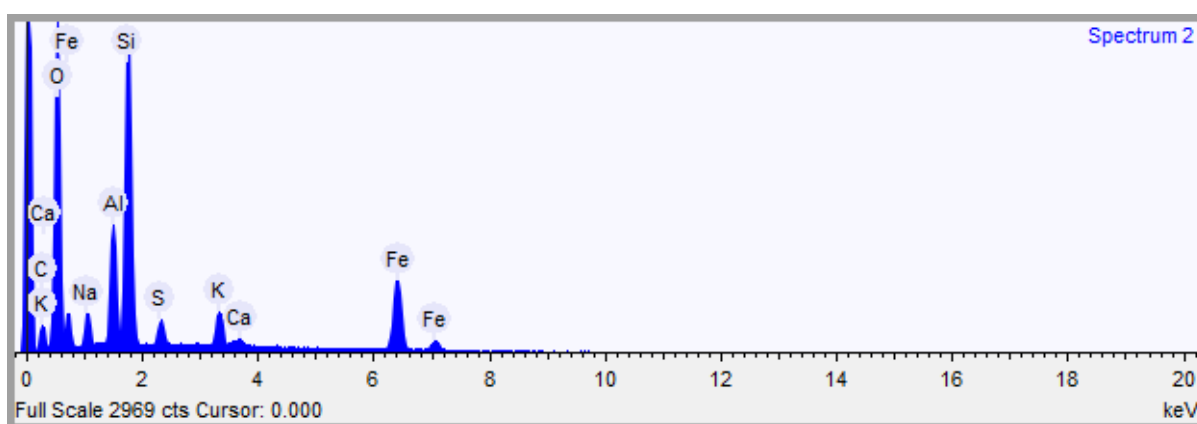


b) Grão com presença de Ferro (Fe).

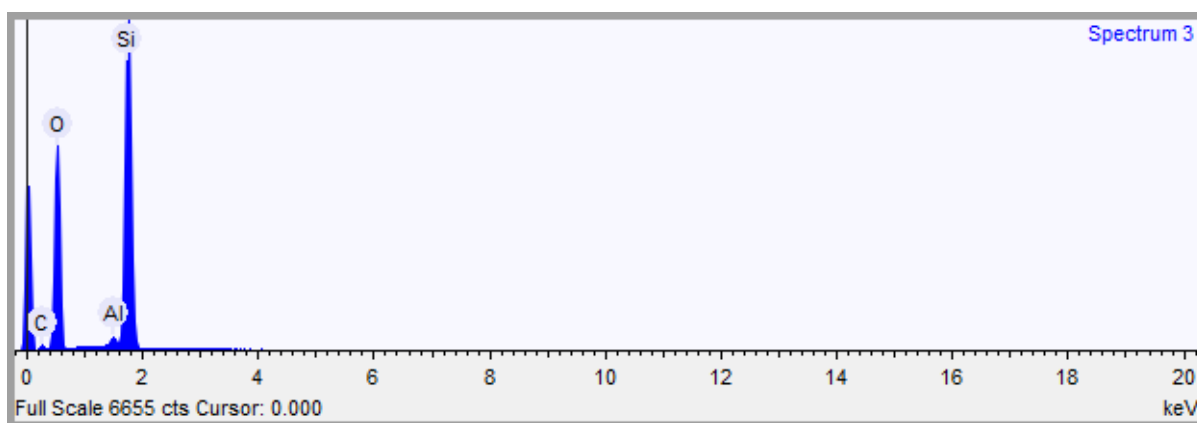
Figura 62: Identificação de grãos com composição diferente do quartzo.



a) Elementos presentes no grão apresentado na Figura 62a



b) Elementos presentes no grão apresentado na Figura 62b



c) Elementos presentes no grão de quartzo

Figura 63: Elementos presentes nos grãos apresentados na Figura 62.

Tabela 6: Valores limites das regiões de interesse.

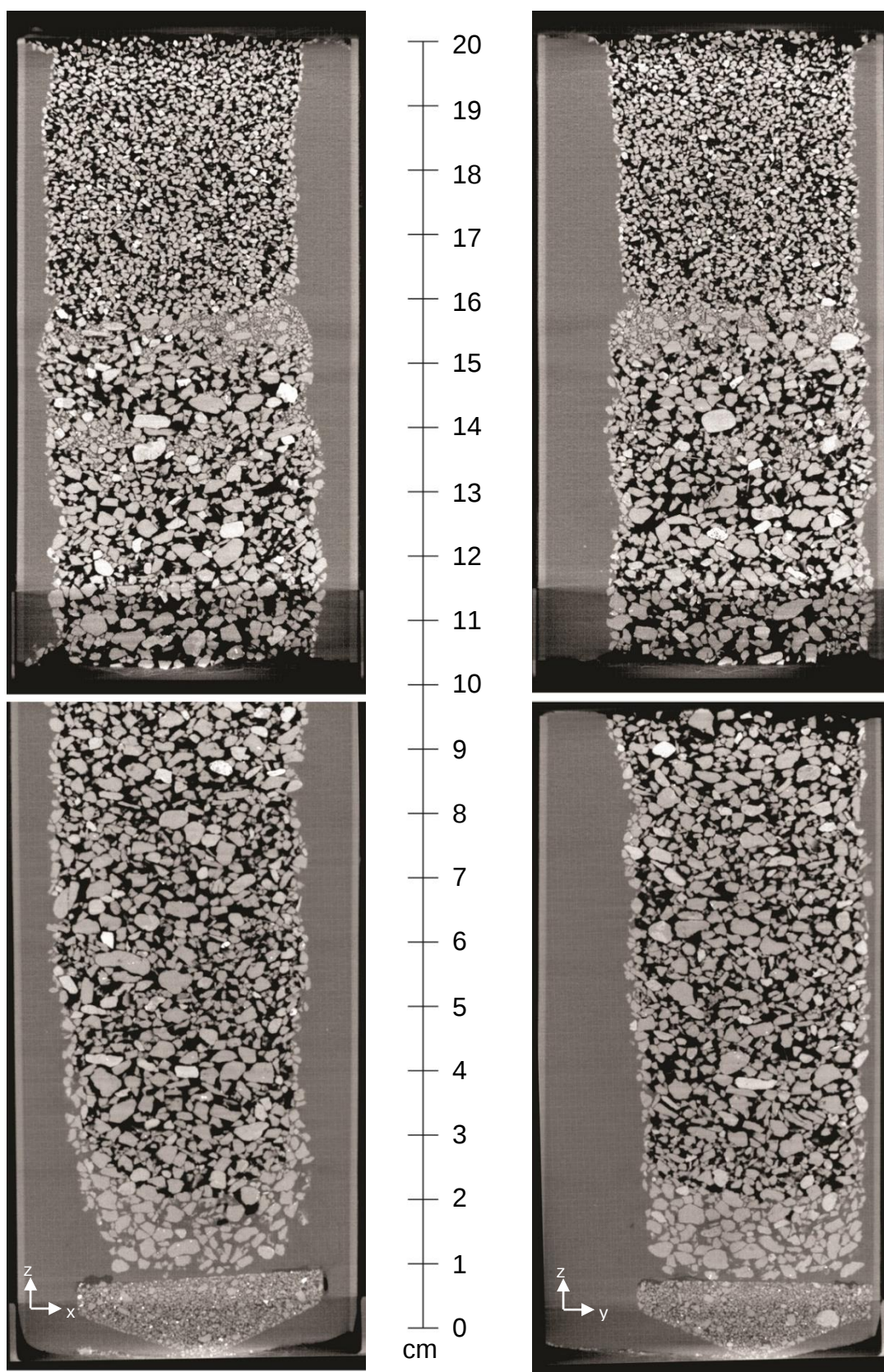
Material	Limite Inferior do Histograma	Limite Superior do Histograma
Areia	131	255
Solo fino	91	131
Vazios	0	91

Conhecidos os valores que limitam o histograma foi possível dar início ao processo de segmentação com a obtenção de informações referentes à morfologia, colmatação, redução da seção transversal e porosidade da coluna granular.

As Figuras 64 e 65 apresentam as seções longitudinais das colunas 6 e 1, respectivamente. A posição das colunas 6 e 1 no modelo pode ser vista na Figura 44. Conforme foi descrito no item 3.2.1, cada coluna foi exumada em duas amostras. Sendo assim, cada coluna está representada por duas camadas, que foram analisadas separadamente e, posteriormente, realinhadas para apresentação.

Conforme pode ser verificado nas Figuras 64 e 65, as regiões limítrofes dos ensaios estão posicionadas nas regiões anteriores a cota 0,0cm, entre as cotas 9,9cm e 10,5cm e acima da cota 19,8cm. Nessas regiões houve amolgamento das amostras devido ao processo de amostragem. Constatou-se ainda a existência de uma região mais escura na base das amostras que podem ser observadas entre as cotas -0,5cm e 0,5cm nas amostras inferiores e 10,0cm e 11,5cm nas amostras superiores, face à presença do suporte desenvolvido para acomodar as amostras durante a aquisição das projeções no tomógrafo (Figura 52).

Ciente destas limitações resolveu-se desconsiderar essas regiões nas análises quantitativas e interpretações.



a) Seção longitudinal no eixo xz

b) Seção longitudinal no eixo yz

Figura 64: Seções longitudinais da coluna 6 completa.

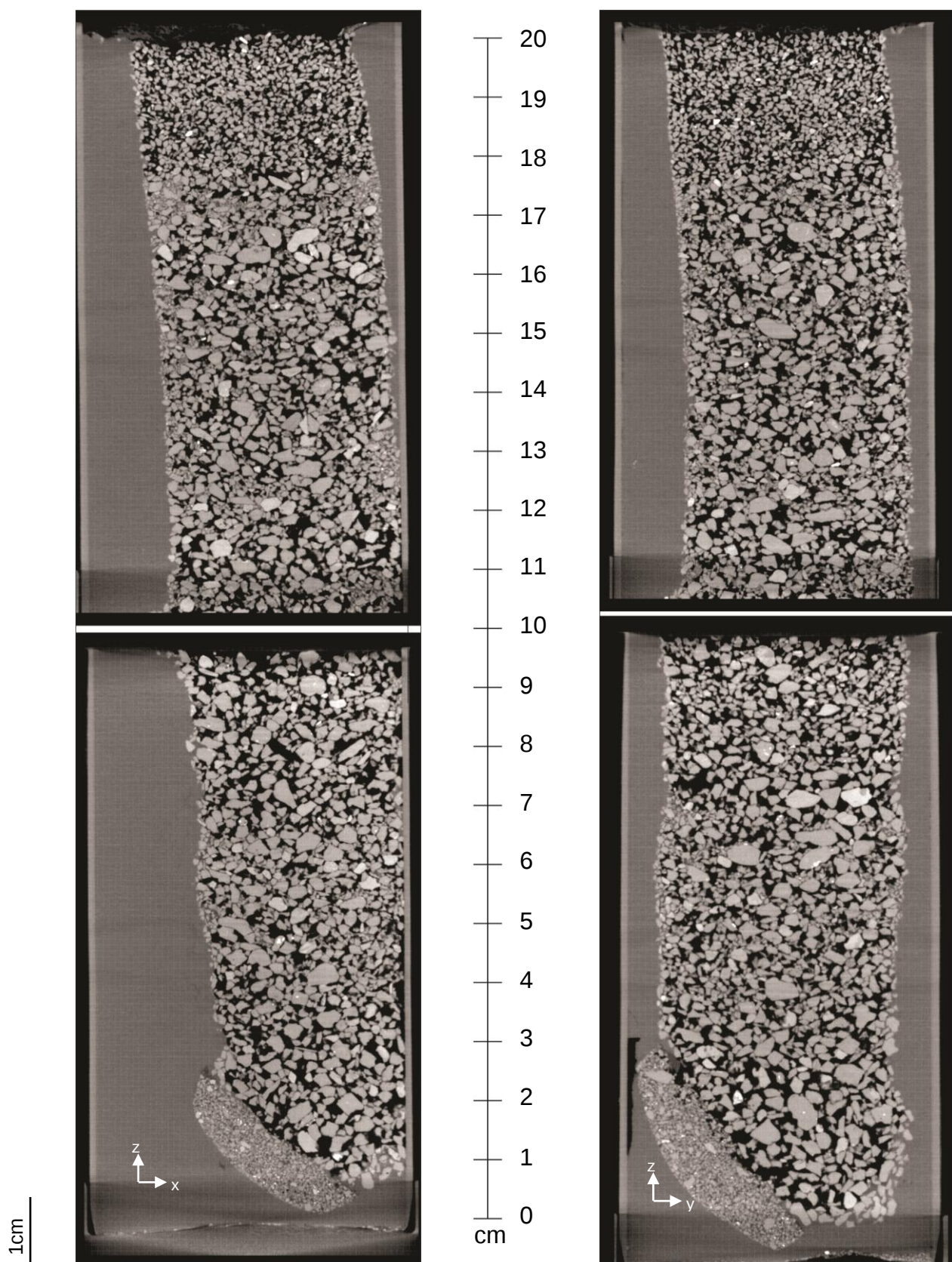


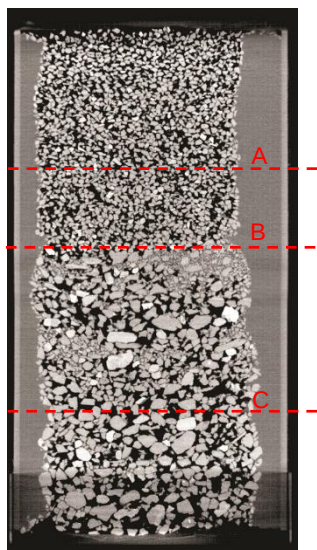
Figura 65: Seções longitudinais da coluna 1 completa

As regiões que foram então analisadas estão representadas pelas Figuras 66 e 68, com a apresentação de seções transversais com distintas características representadas em tons de cinza. A princípio é possível identificar qualitativamente características a respeito da presença de materiais com tamanhos de grãos diferentes como quando se compara as seções transversais A e D, também é possível identificar regiões intensamente colmatadas como pode ser observado na seção E. Essas características que foram citadas serão doravante com mais detalhes.

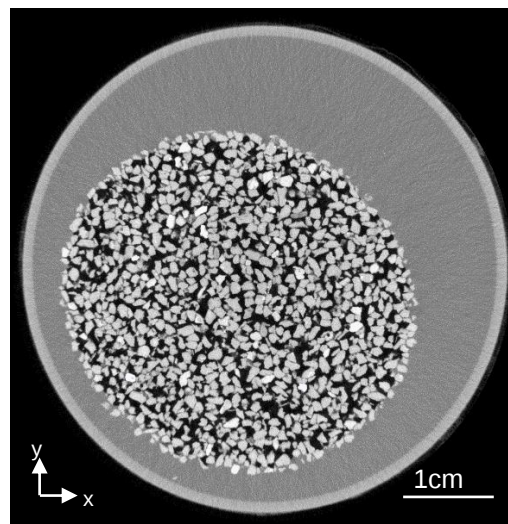
4.1. Morfologia

Quanto à morfologia, é possível observar nas Figuras 68 e 69 uma visão geral da forma longitudinal das colunas 6 e 1. Na coluna 6 foi possível verificar a ocorrência de redução de seção transversal da coluna granular nos pontos indicados com setas vermelhas, como próximo a ponteira e aproximadamente 2,5 cm abaixo do topo da coluna. Foi possível também identificar a ocorrência de pequenos bulbos ao longo da coluna como indicam as setas amarelas. Ainda na coluna 6 foi possível observar que o posicionamento da ponteira, indicada por setas verdes, foi horizontal, como idealizado.

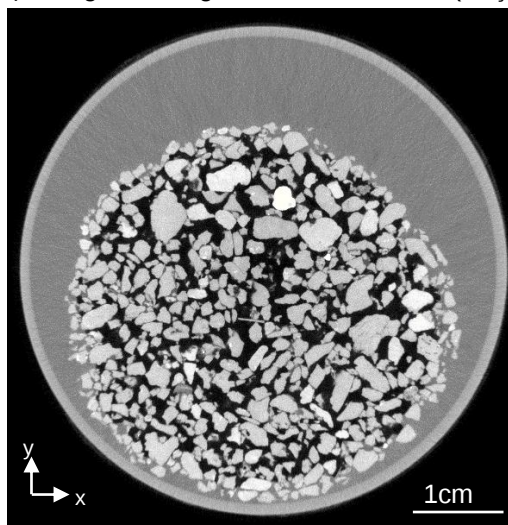
Já na coluna 1 foi possível observar que a coluna está rotacionada em aproximadamente 5° como mostra a Figura 70. A angulação foi considerada em relação à lateral esquerda da coluna, já que a lateral direita foi amolgada durante a amostragem.



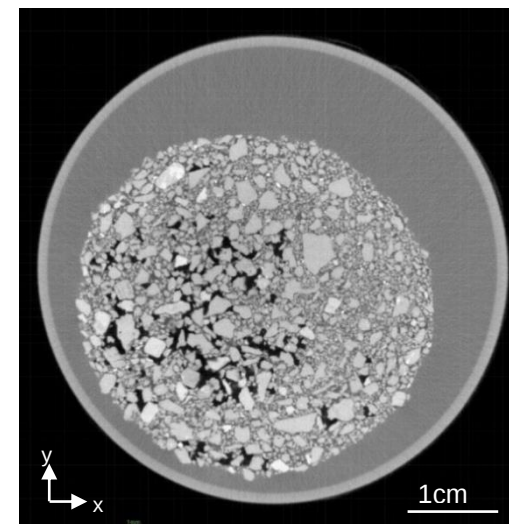
a) Seção longitudinal



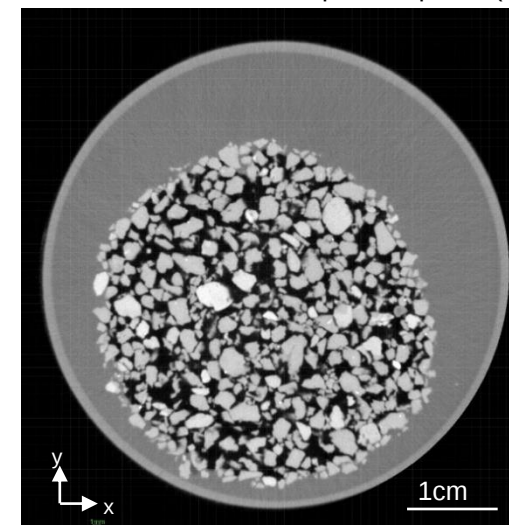
b) Região com granulometria menor (Seção A)



d) Região com granulometria maior (Seção C)

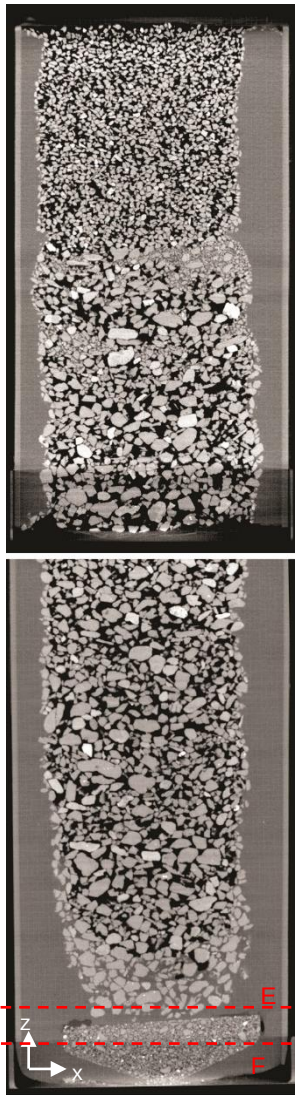


c) Região com intrusão de finos na parte superior (Seção B)

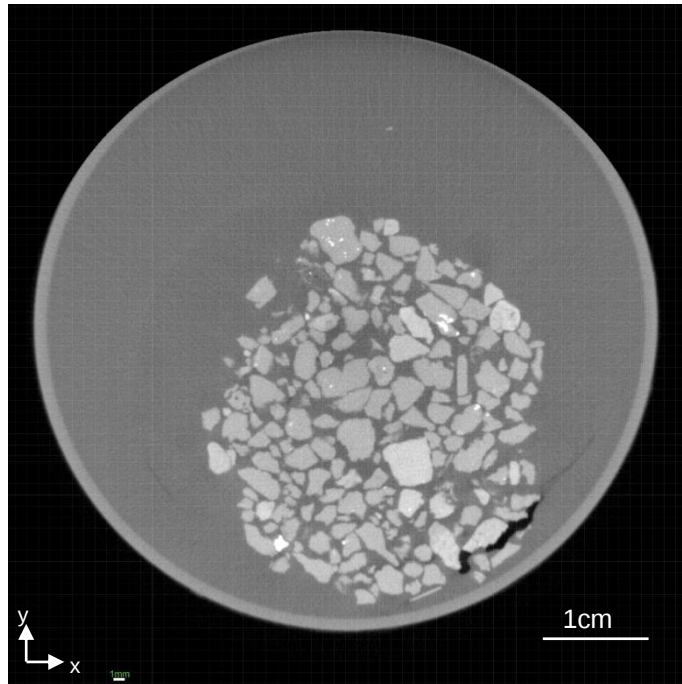


e) Região sem colmatção na parte inferior da coluna (Seção D)

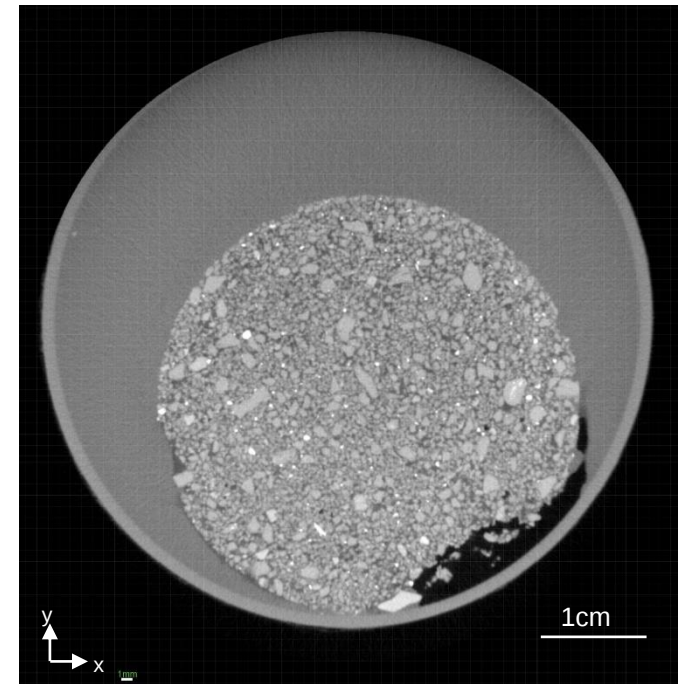
Figura 66: Seções transversais



a) Seção longitudinal

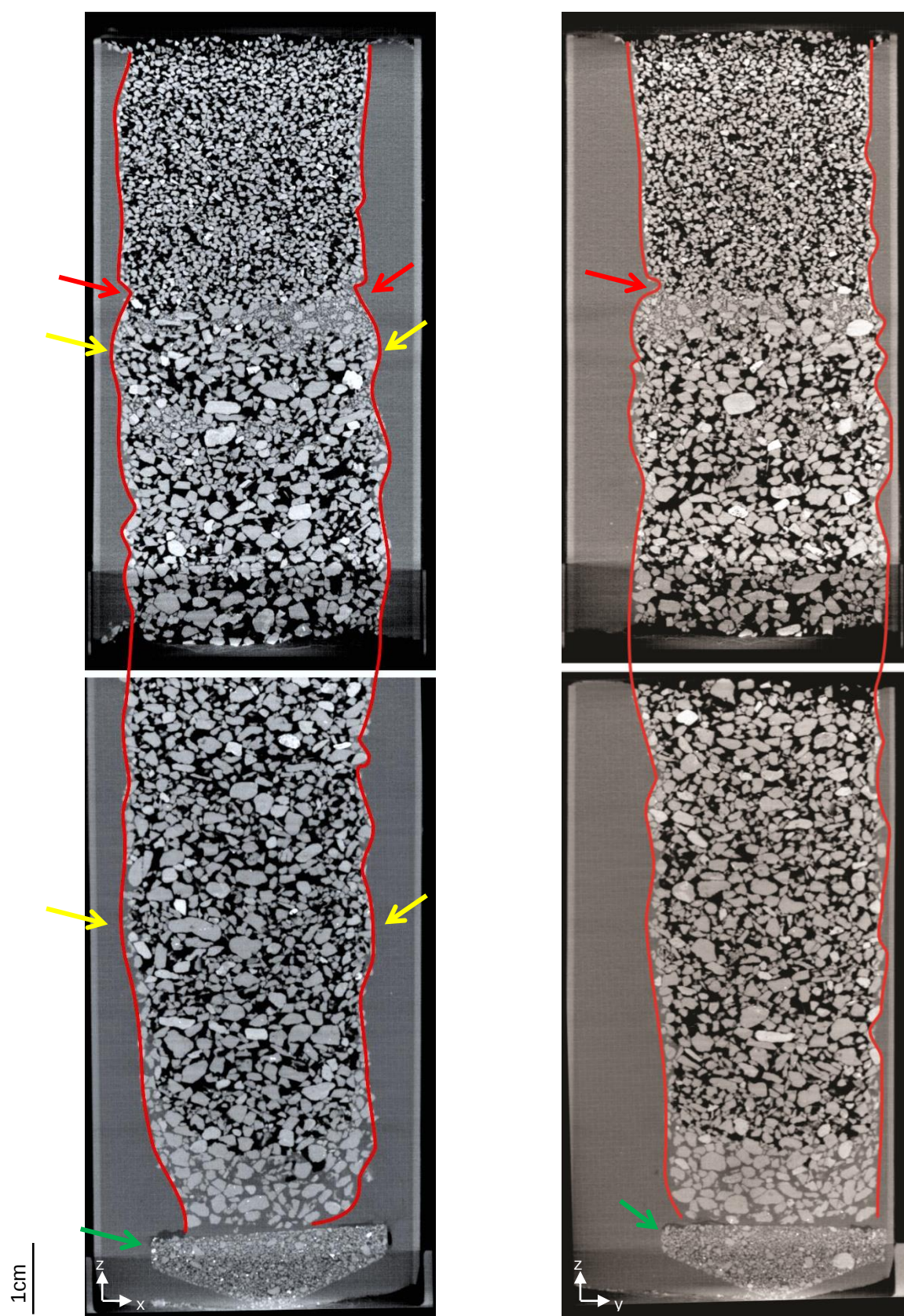


b) Região com contaminação acima da ponteira (Seção E)



c) Região da ponteira (Seção F)

Figura 67: Seções trasnversais



a) Seção longitudinal com delimitação da estrutura no eixo xz

b) Seção longitudinal com delimitação da estrutura no eixo yz

Figura 68: Delimitação da forma da estrutura da coluna 6.

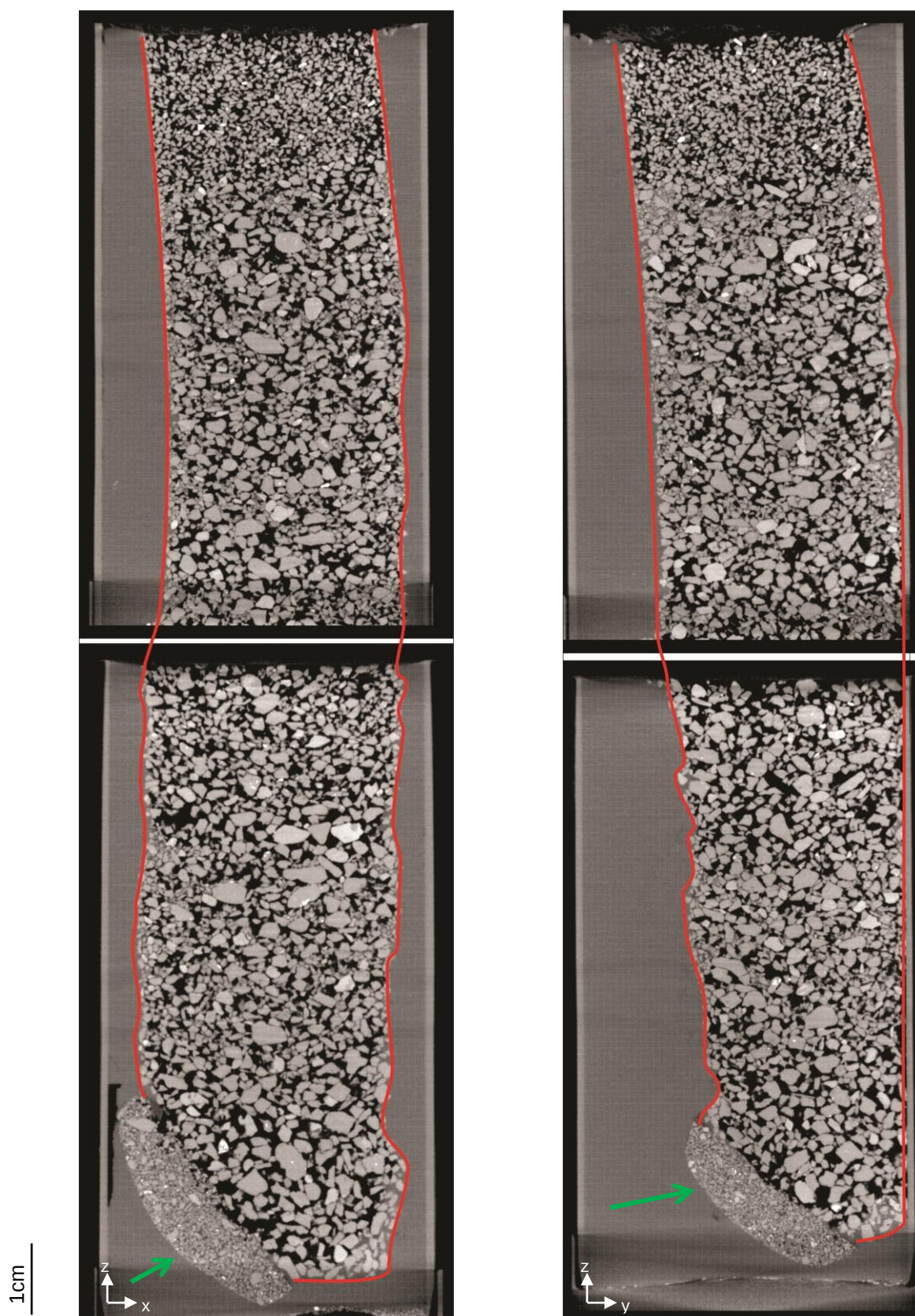


Figura 69: Delimitação da forma da estrutura da coluna 1

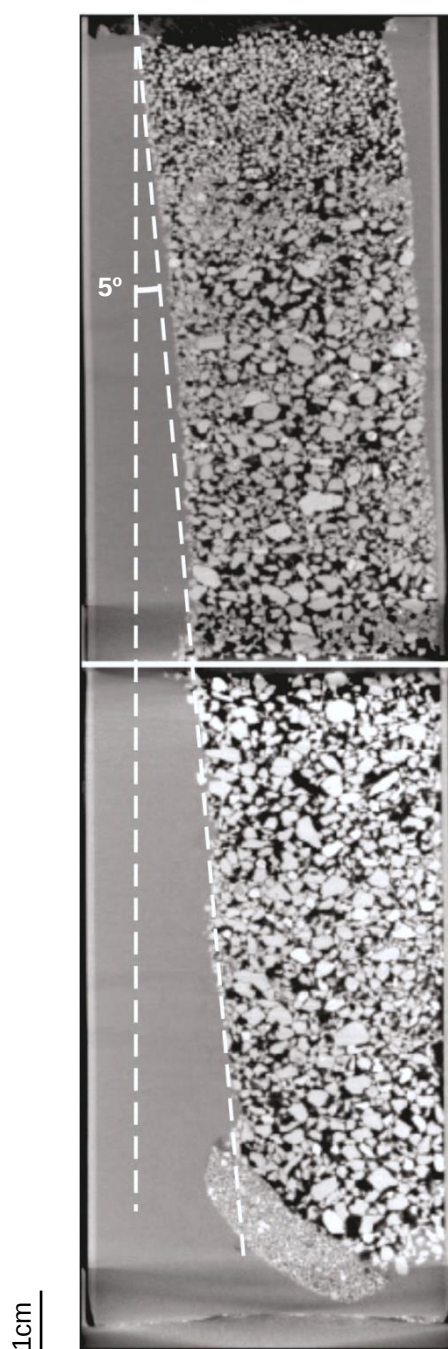
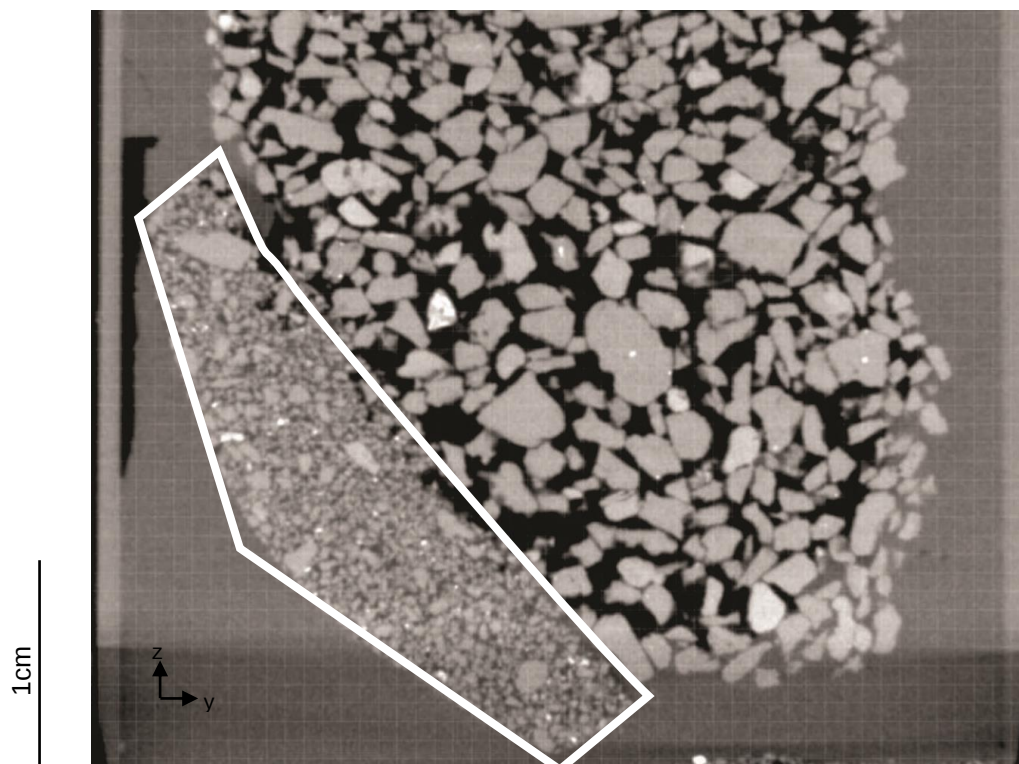
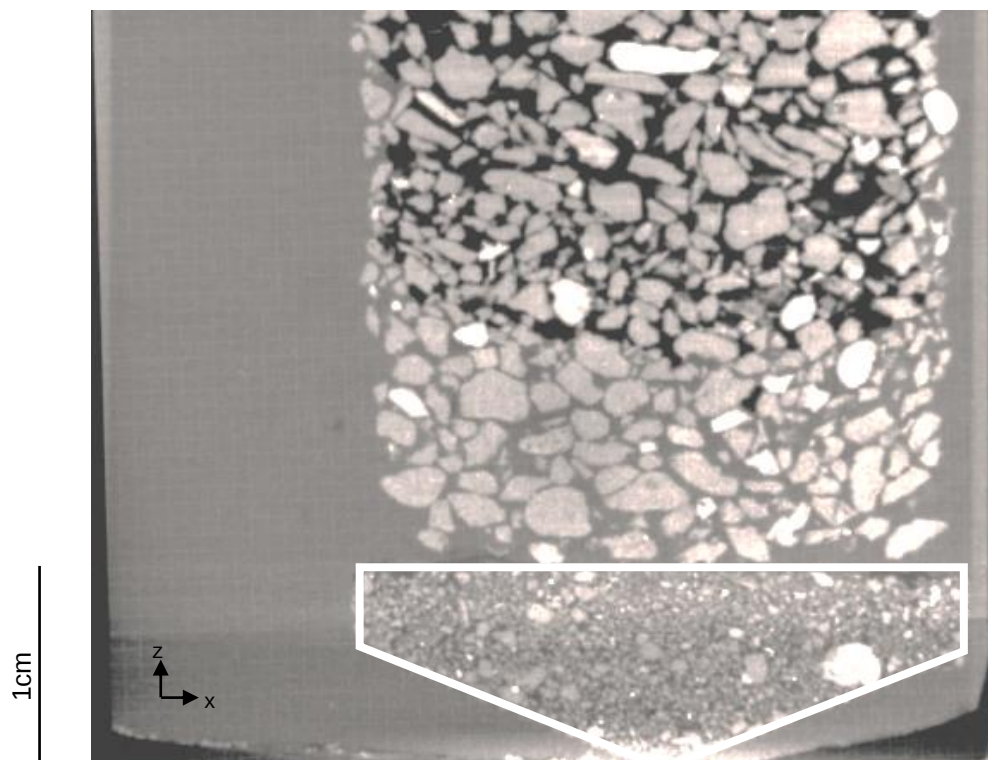


Figura 70: Inclinação da coluna 1

Observou-se ainda que a ponteira não está assentada horizontalmente, tendo, possivelmente, se descolado da ponteira de forma desigual e se movimentado à medida que o tubo auxiliar à construção era sacado. A rotação da ponteira da coluna 1 foi de aproximadamente 52° e pode ser observado na Figura 71.



a) Posicionamento da ponteira da coluna 1



b) Posicionamento da ponteira da coluna 6

Figura 71: Posicionamento das ponteiras das colunas 1 e 6

A respeito de características relacionadas à disposição do material granular, foi possível verificar através de análise visual que houve uma segregação do material, ficando depositado na camada superior o material de granulometria menor e na parte inferior o material de granulometria maior. Isso se repete nas duas colunas analisadas. Na coluna 6, mostrada na Figura 72, a delimitação entre as camadas está bem definida e a camada superior tem a espessura de aproximadamente 2,2 cm. Já na coluna 1 apresentada na Figura 73, a delimitação entre as camadas não se mostra muito bem definida e ela tem aproximadamente 1,5 cm de espessura.

A linha amarela nas Figuras 72a e 73a representa o limite entre as camadas. As Figuras 72b e 73b e Figuras 72c e 73c apresentam, respectivamente, a seção da região onde é possível observar que o material granular tem menor granulometria (Seção A) e a seção da região com material granular de maior granulometria (Seção B).

Além de imagens em duas dimensões, é possível obter também reconstruções em 3D das amostras ensaiadas no tomógrafo para fins ilustrativos. As Figuras 74 e 75 apresentam imagens sequenciais do manuseio das amostras reconstruídas, apresentando a coluna granular inteira e sem ocultação de nenhuma das regiões (a), seguida do procedimento de corte, onde é possível distinguir a matriz do tubo de PVC (b), dando prosseguimento ao corte até atingir a região granular é possível distinguir o tubo de PVC, matriz, ponteira e material granular da coluna (c e d). Após identificados os limites da coluna granular recuou-se o corte anterior ficando exposto somente a matriz e foi realizado um novo corte concomitante e perpendicular ao anterior (e) e então se ocultou a região onde existe a matriz para que se fosse possível observar em 3D somente a coluna granular e a ponteira (f), utilizando-se o artifício de rotacionar a amostra (g) e aproximar em regiões de possível interesse como a ponteira (h).

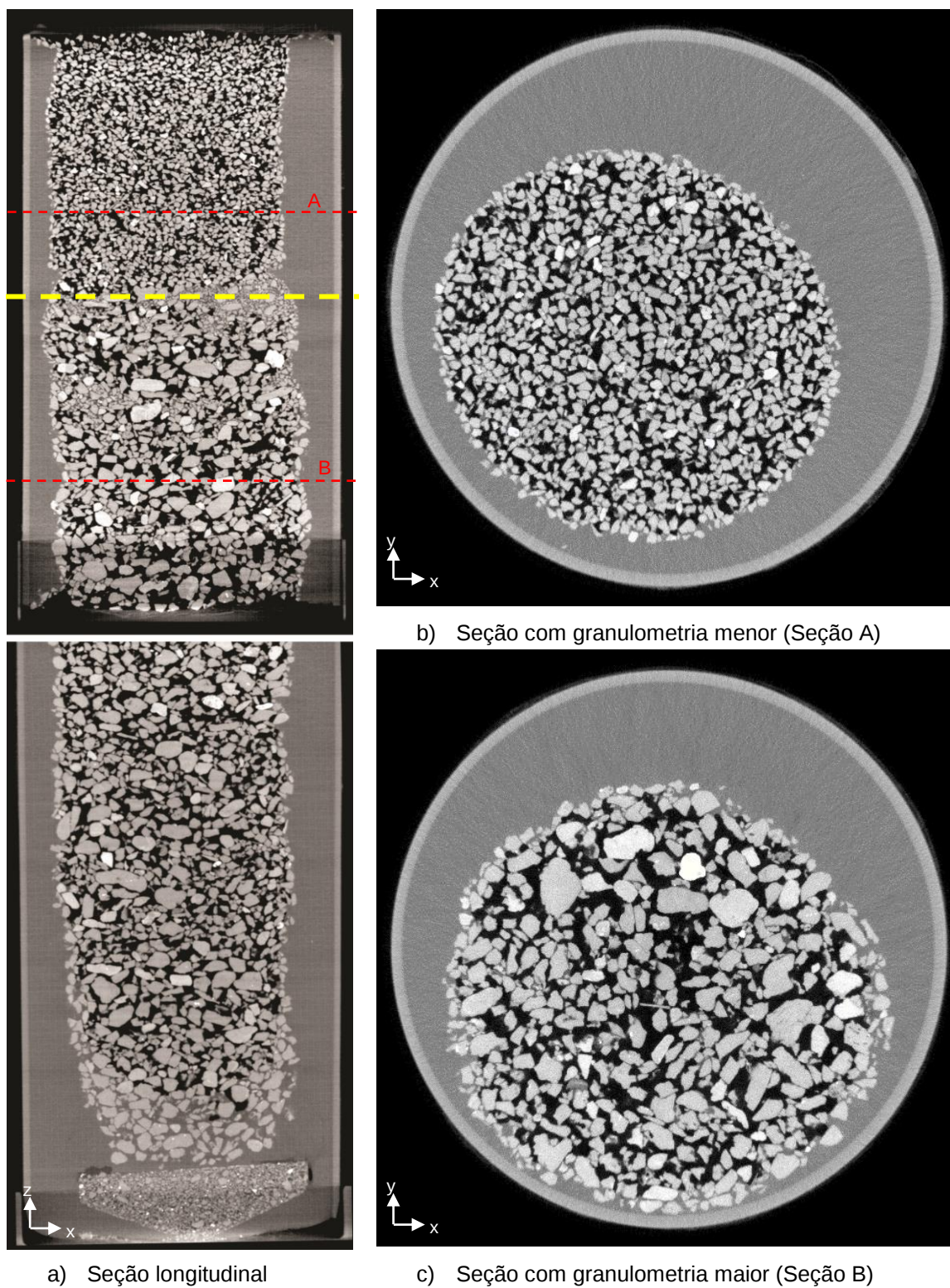
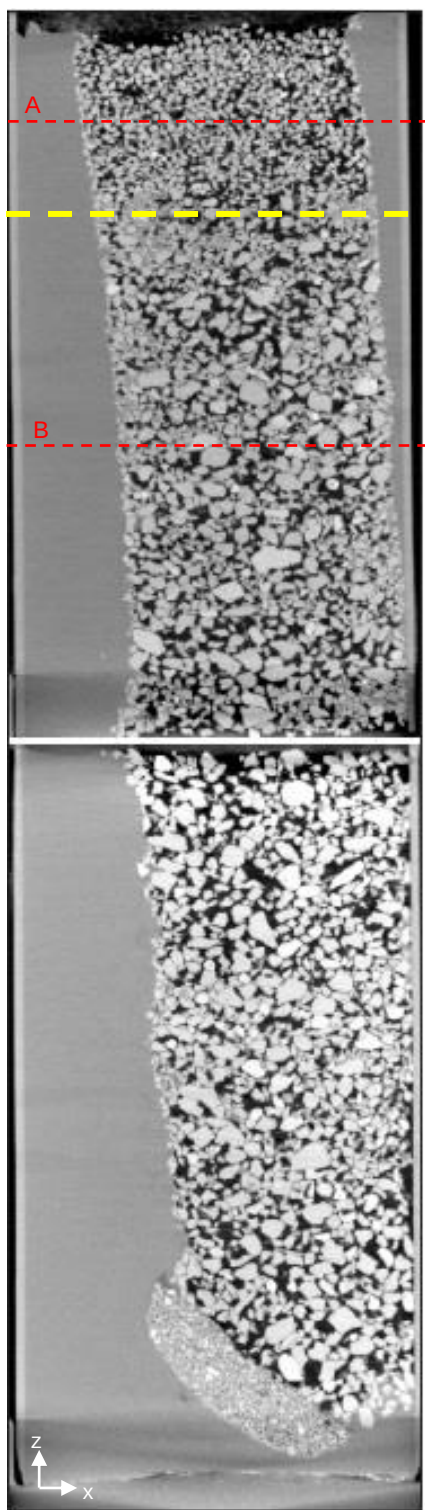
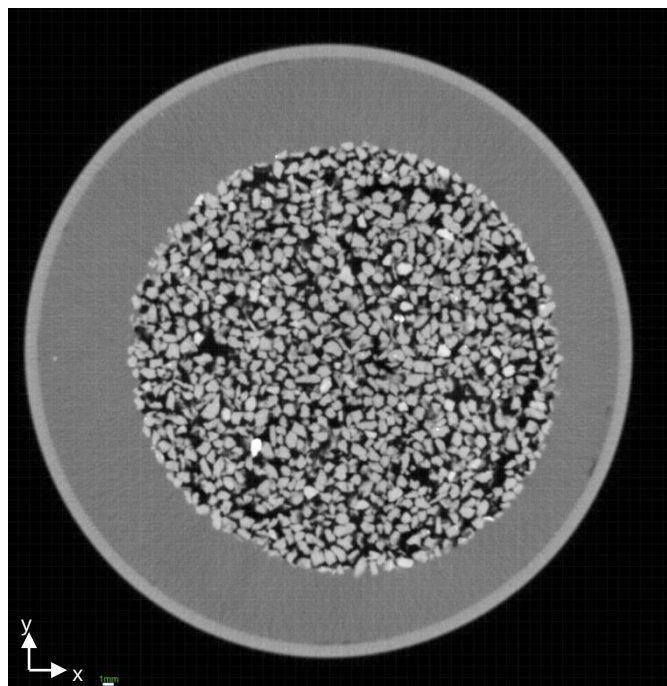


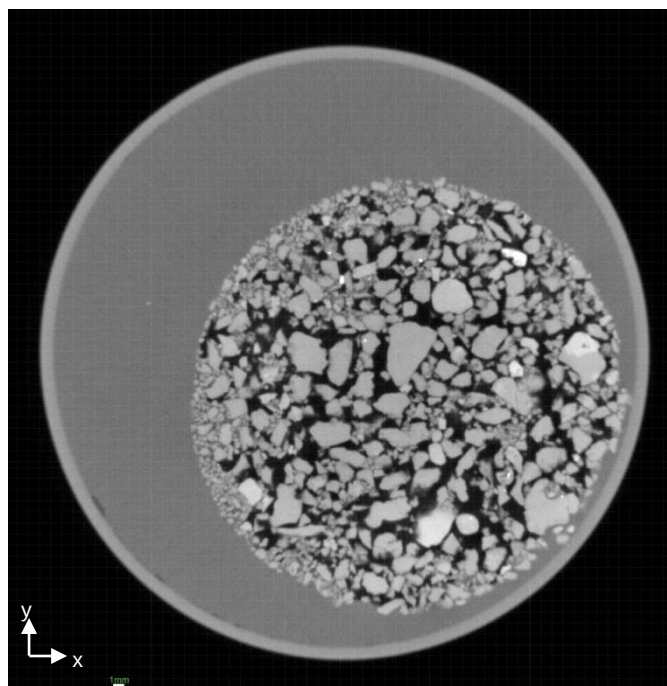
Figura 72: Distinção entre camadas de diferentes granulometrias na coluna 6



b) Seção longitudinal

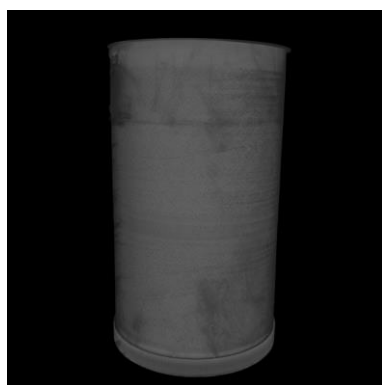


c) Seção com granulometria menor (Seção A)

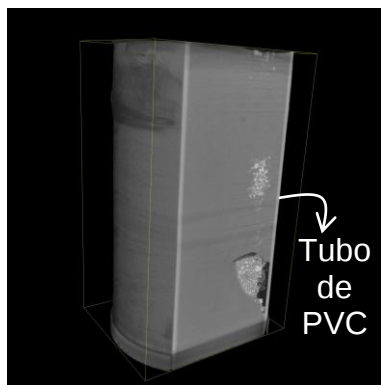


d) Seção com granulometria maior (Seção B)

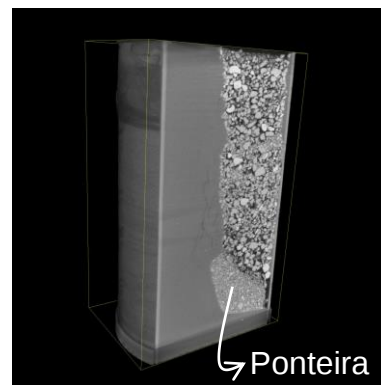
Figura 73: Distinção entre camadas de diferentes granulometrias na coluna 1



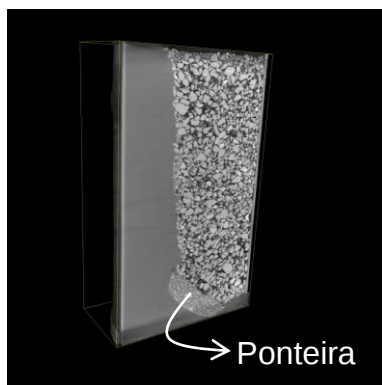
a) Vista sem cortes



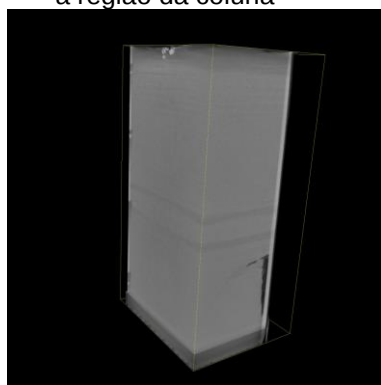
b) Corte começando a atingir a região da coluna



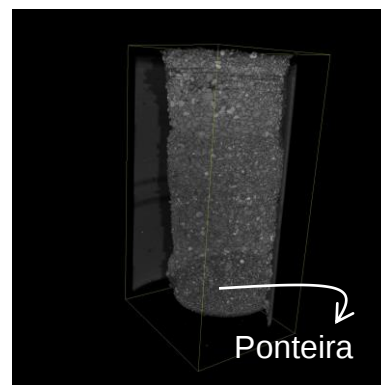
c) Corte intermediário



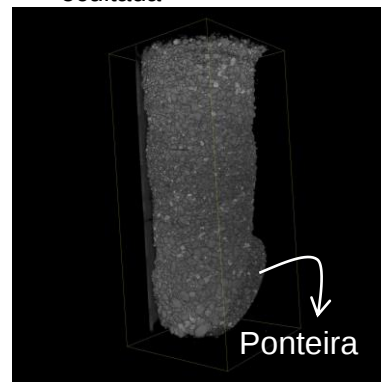
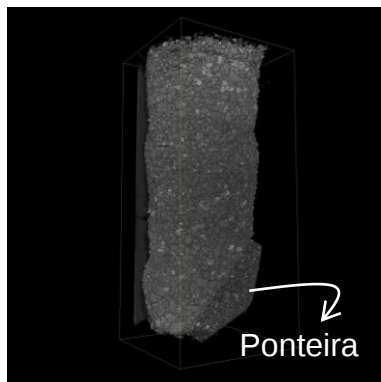
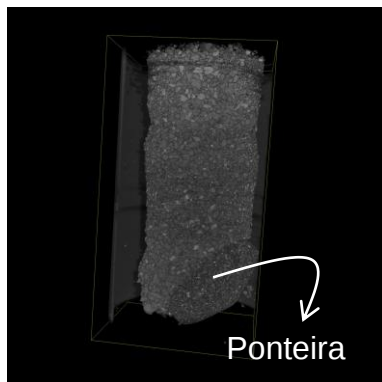
d) Corte próximo a região central da coluna



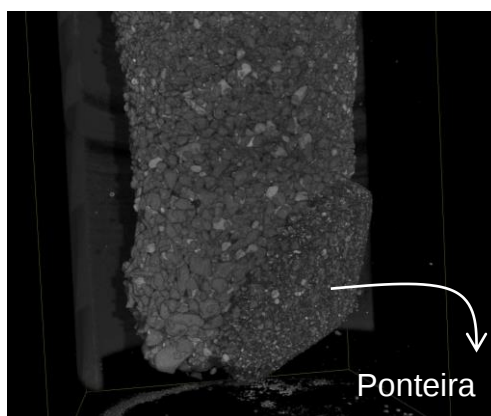
e) Corte sem atingir a coluna



f) Mesma imagem da Figura 73e com a região de finos oculta



g) Figura 73f com diversas rotações

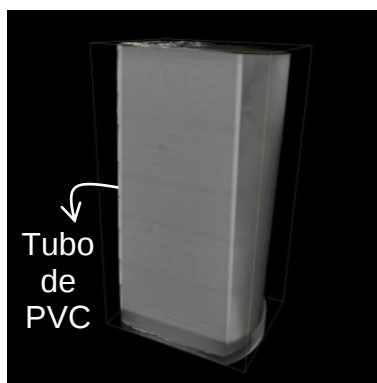


h) Aproximação da região da ponteira

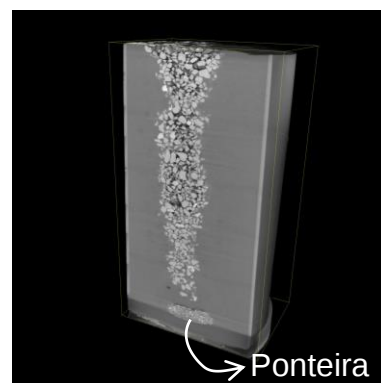
Figura 74: Imagens em 3D da amostra coluna 1 - base



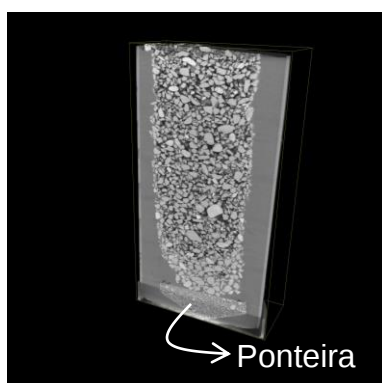
a) Vista sem cortes



b) Corte começando a atingir a região da coluna



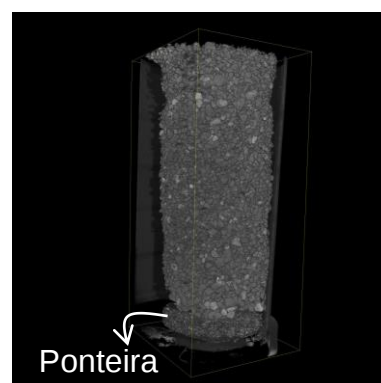
c) Corte intermediário



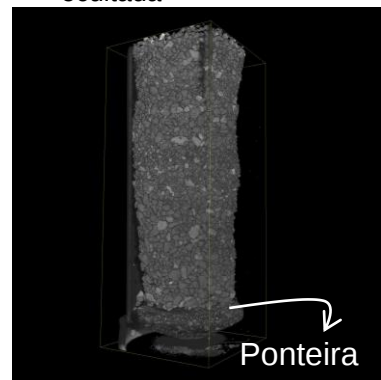
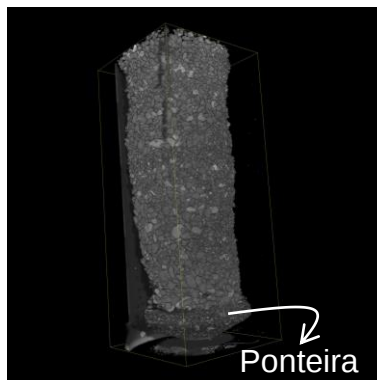
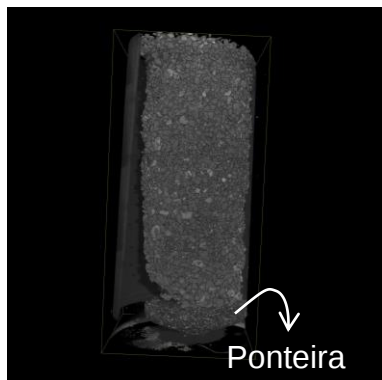
d) Corte próximo a região central da coluna



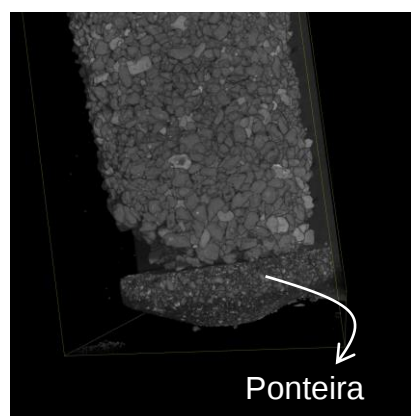
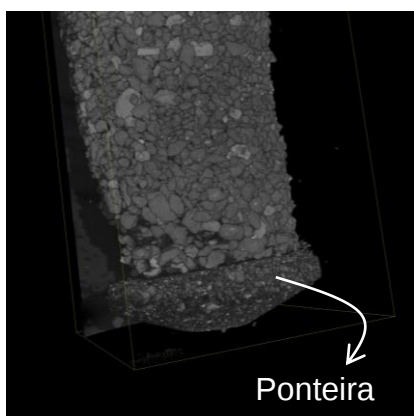
e) Corte sem atingir a coluna



f) Mesma imagem da Figura 74e com a região de finos ocultada



g) Figura 74f com diversas rotações



h) Aproximação da região da ponteira

Figura 75: Imagens em 3D da amostra coluna 6 - base

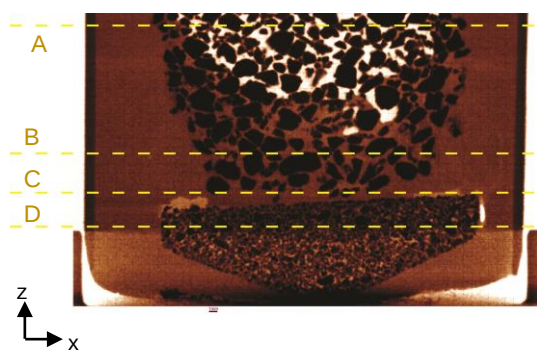
4.2. Colmatação

Outro importante resultado que foi obtido a partir da análise das imagens processadas foi a presença de regiões de intensa colmatação dos poros. Próximo à ponteira porosa da coluna 6 foi identificada a presença desse tipo de problema. É possível observar nas seções transversais apresentadas nas Figuras 76a e 76b, que a região representada pela seção A tem a presença de uma pequena colmatação, podendo ser observado uma região de vazios representada pela cor branca, já nas seções B e C prevalece a presença de ocupação de vazios pela matriz de textura fina. Dessa imagem é possível concluir que a drenagem pela camada inferior à coluna foi menos eficaz do que a drenagem pela camada drenante superior, o que pode ter reduzido a velocidade de adensamento.

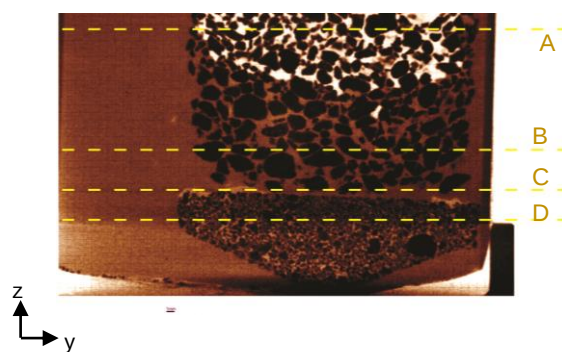
Ainda sobre colmatação, foi possível visualizar a aproximadamente 2,5 cm abaixo do topo da coluna 6 uma região onde os vazios foram contaminados pela matriz de textura fina, que é apresentada na Figura 77.

Outra importante questão que pode ser analisada com o auxílio da tomografia é a região de penetração de finos da *smear zone*.

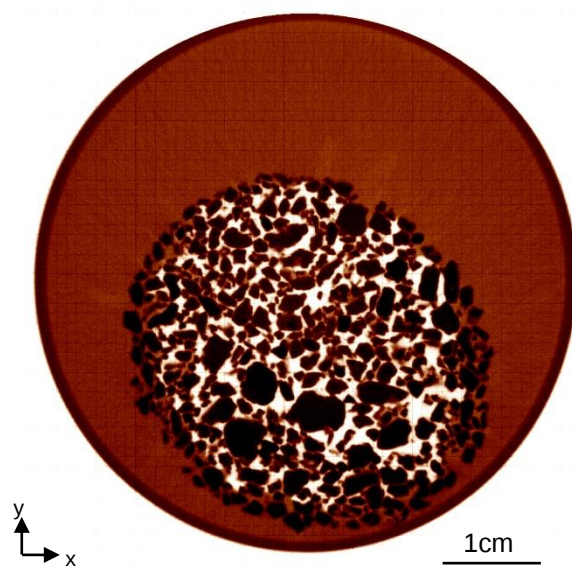
A existência dessa região pode ser explicada levando-se em conta a compatibilidade granulométrica para a função de filtro e de dreno estudadas por Qian *et al.* (2002). Como houve a segregação do material utilizado na coluna durante o processo construtivo, não foi possível tomar como real a granulometria da caracterização desse material, impossibilitando o cálculo desses critérios.



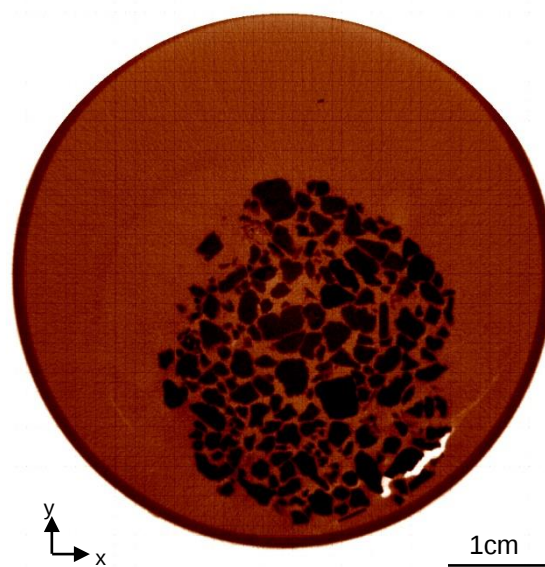
a) Eixo xz



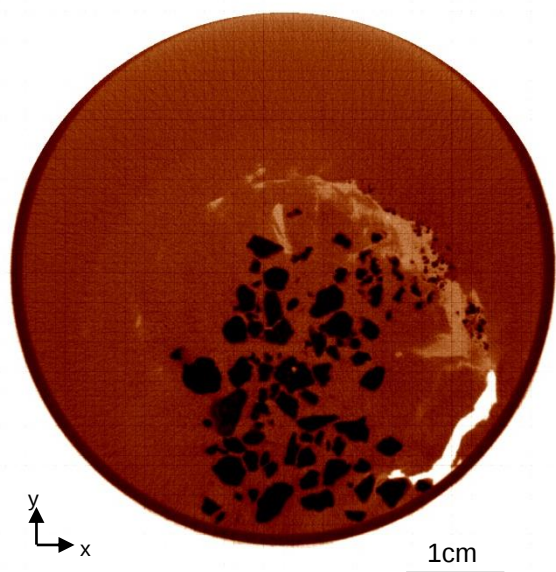
b) Eixo yz



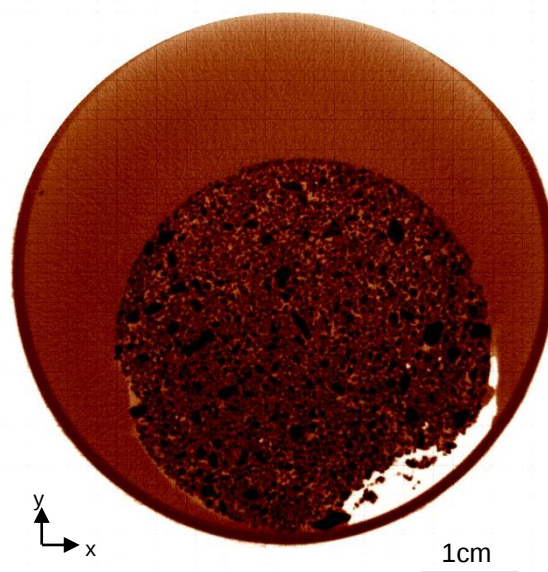
c) Região sem contaminação (Seção A)



d) Região contaminada sem grande variação da seção (Seção B)

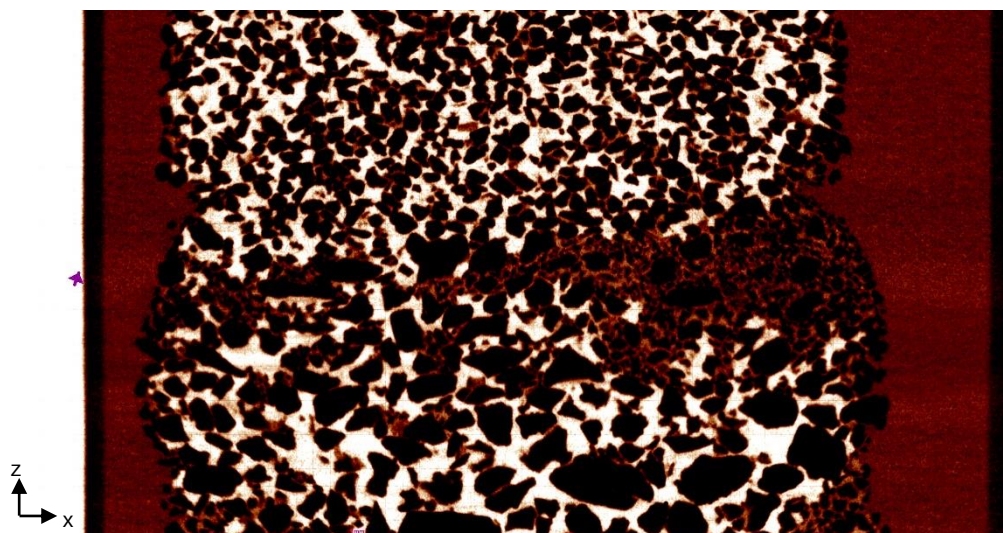


e) Região contaminada com afunilamento da seção (Seção C)

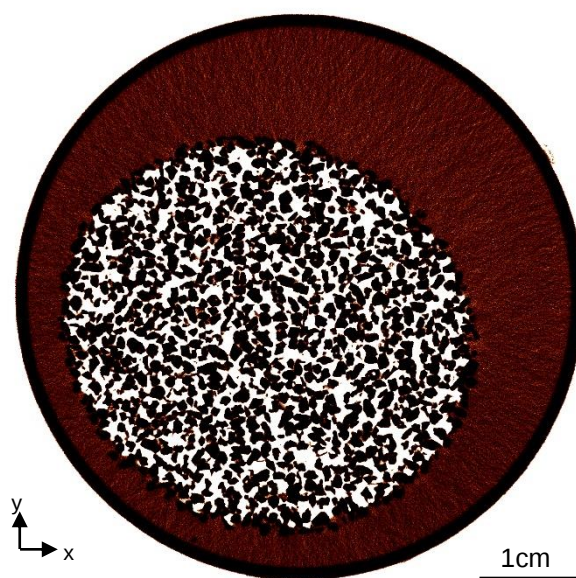


f) Região da ponteira porosa (Seção D)

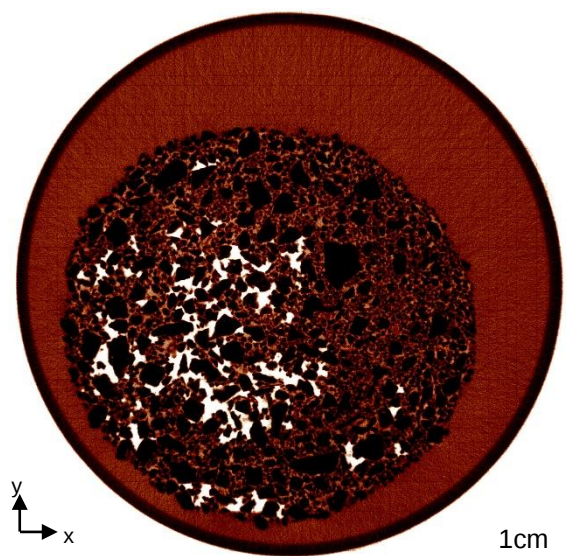
Figura 76: Colmatação próximo à ponteira porosa da coluna 6.



a) Seção Longitudinal da região colmatada



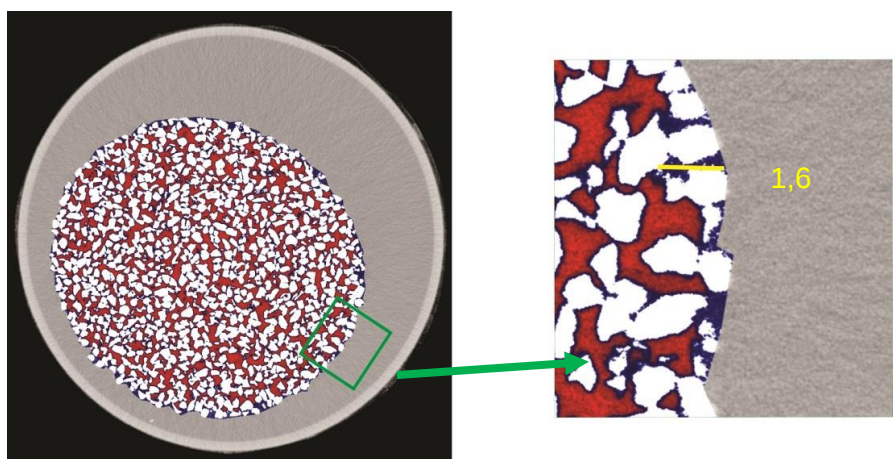
b) Região sem colmatção excessiva (Seção A)



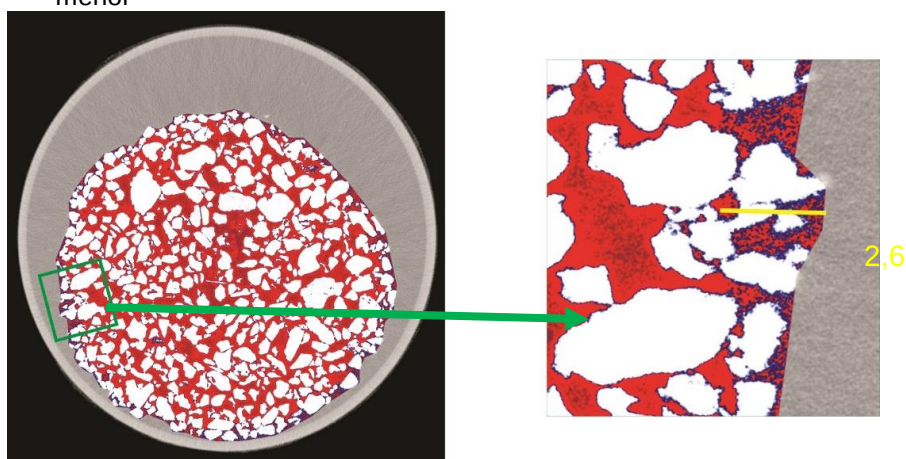
c) Região com muita colmatção (Seção B)

Figura 77: Colmatção localizada 2,5 cm abaixo do topo da coluna 6

Observa-se na Figura 78a uma seção transversal correspondente à região cuja coluna é constituída de granulometria menor e na Figura 78b uma seção transversal correspondente à região cuja coluna é constituída de granulometria maior. Pode-se observar que nos detalhes apresentados à direita, os retângulos verdes indicados foram ampliados em mesma proporção em ambas as seções.



a) Região de penetração de finos da smear zone da região com granulometria menor



b) Região de penetração de finos da smear zone da região com granulometria maior

Figura 78: Comparação entre colmatações em regiões com granulometrias distintas (medidas em mm)

Apesar de não ter sido desenvolvido um estudo quantitativo acerca da existência da região de penetração de finos da smear zone, observou-se que há a ocorrência de colmatção e que nas áreas em destaque a espessura das colmatações nas Figuras 77a e 77b foram, respectivamente 1,6mm e 2,6mm.

4.3. Estimativa da porosidade da coluna granular

Para a quantificação da porosidade da coluna granular foi utilizado o *software* CTan. Foi necessário criar uma região de interesse (ROI) que se restringisse a coluna granular. Para isso foi pré-delimitada uma região elíptica de interesse que incluísse a coluna granular e a matriz argilosa do seu entorno. Após isso, foi gerada uma imagem binária com a região granular distinguindo-se dos outros materiais a partir da manipulação do histograma, onde os limites de tons de cinza estão entre 171 e 255. Na imagem binária foi feita uma intervenção com o uso do *software Paint* da Microsoft para unir todos os grãos em uma só região que abrangesse grãos e vazios. O binário em questão foi utilizado para a definição da ROI definitiva para a determinação da porosidade. A Figura 79 apresenta as imagens de cada etapa citada.

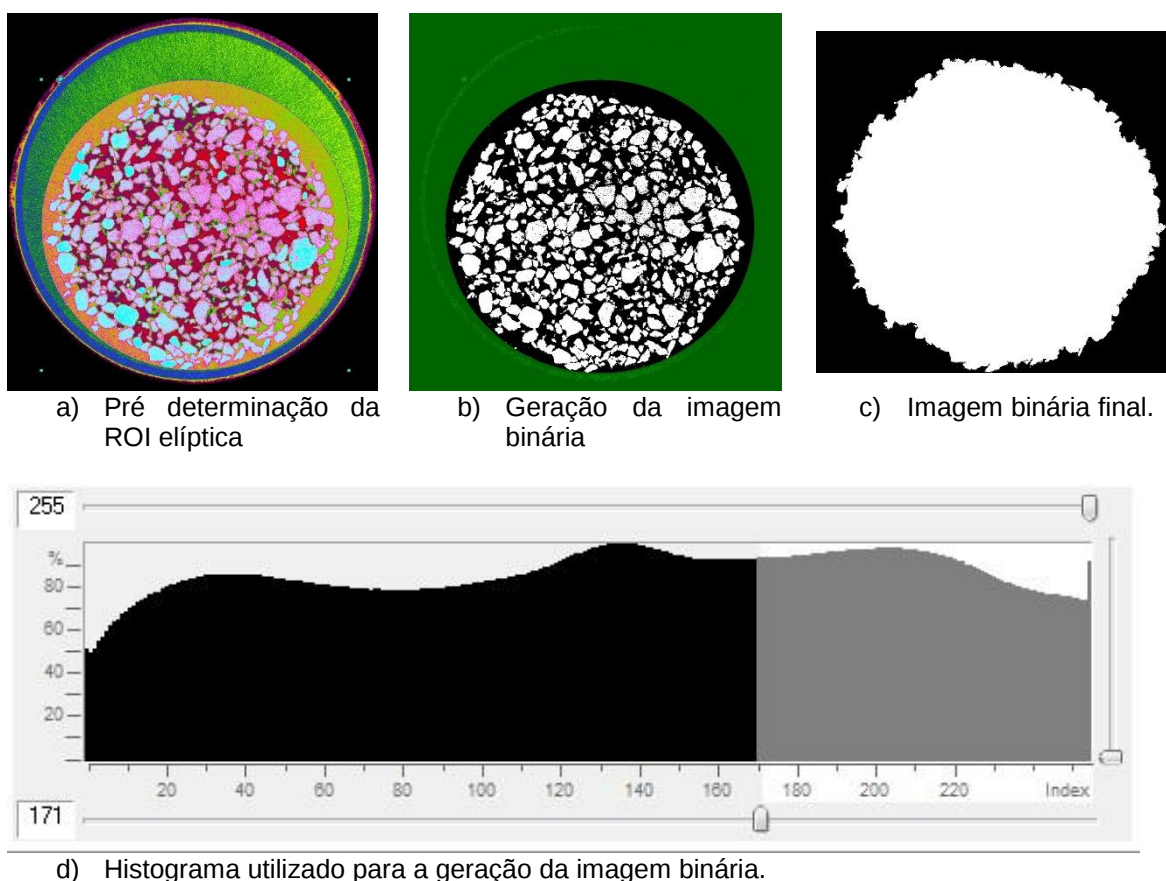
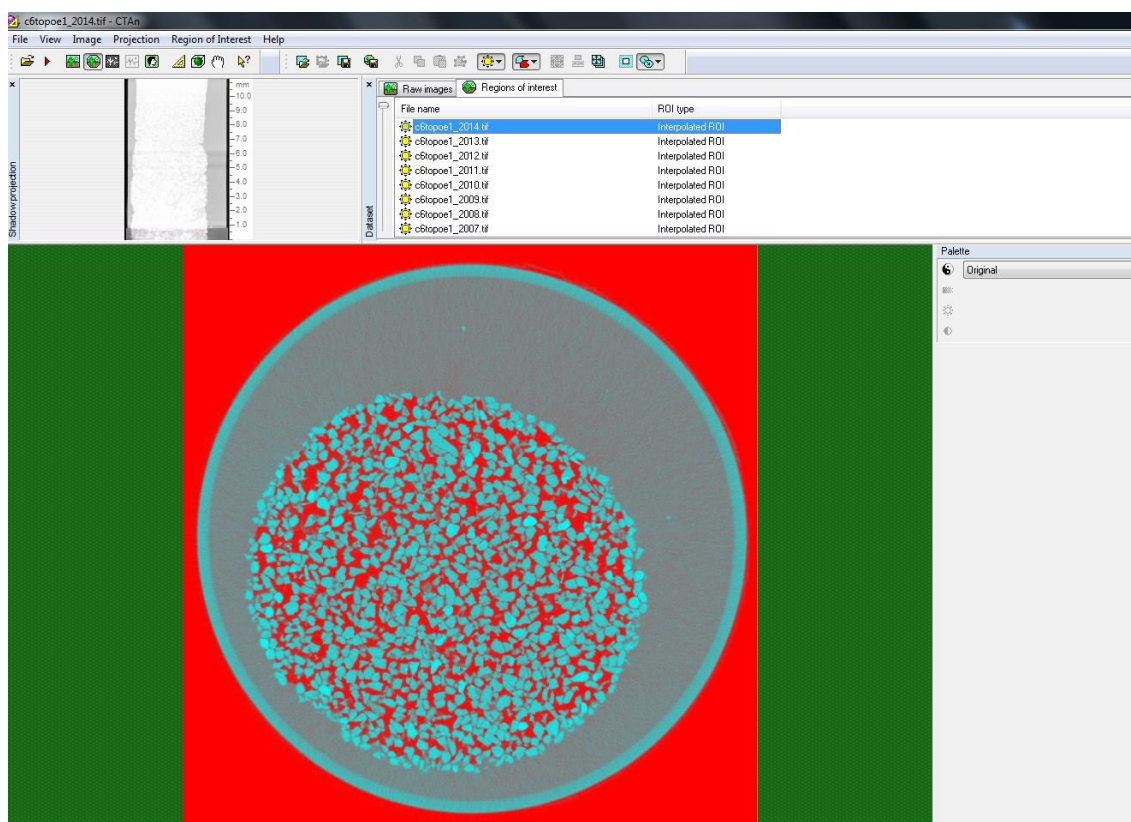
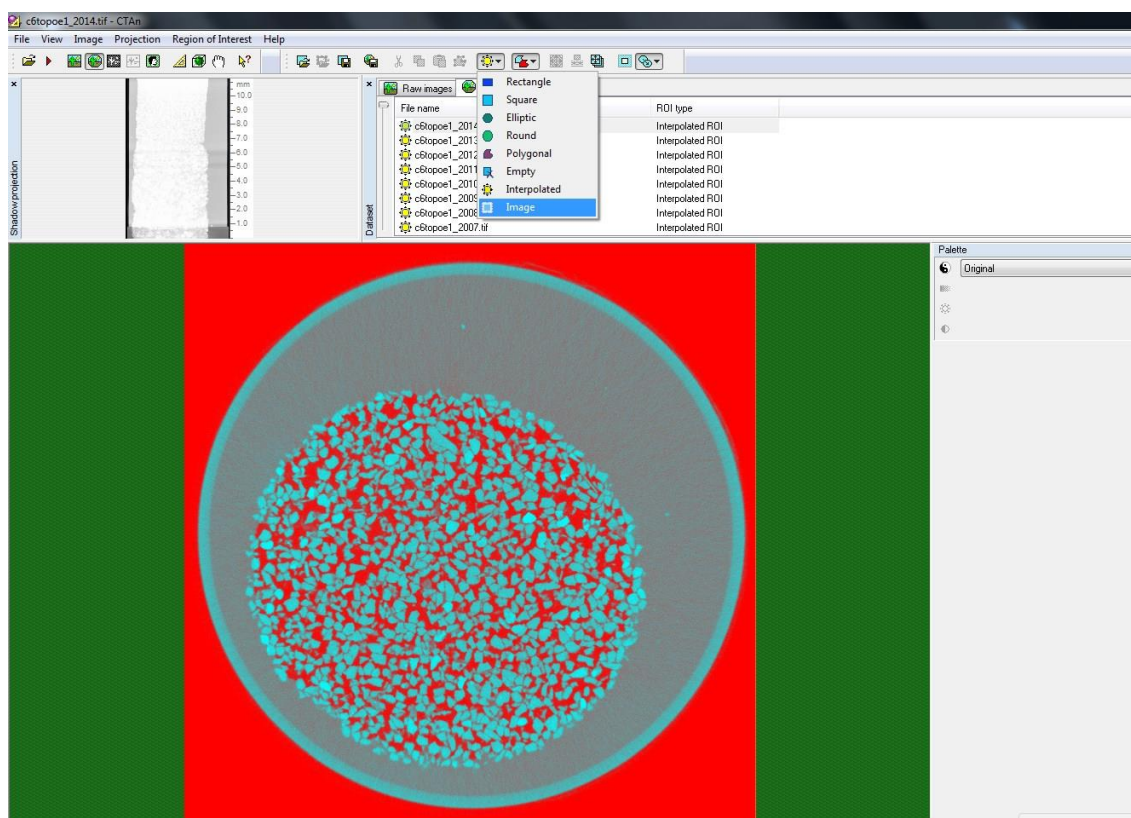


Figura 79: Procedimento para determinação da ROI delimitada para definir a região com material granular

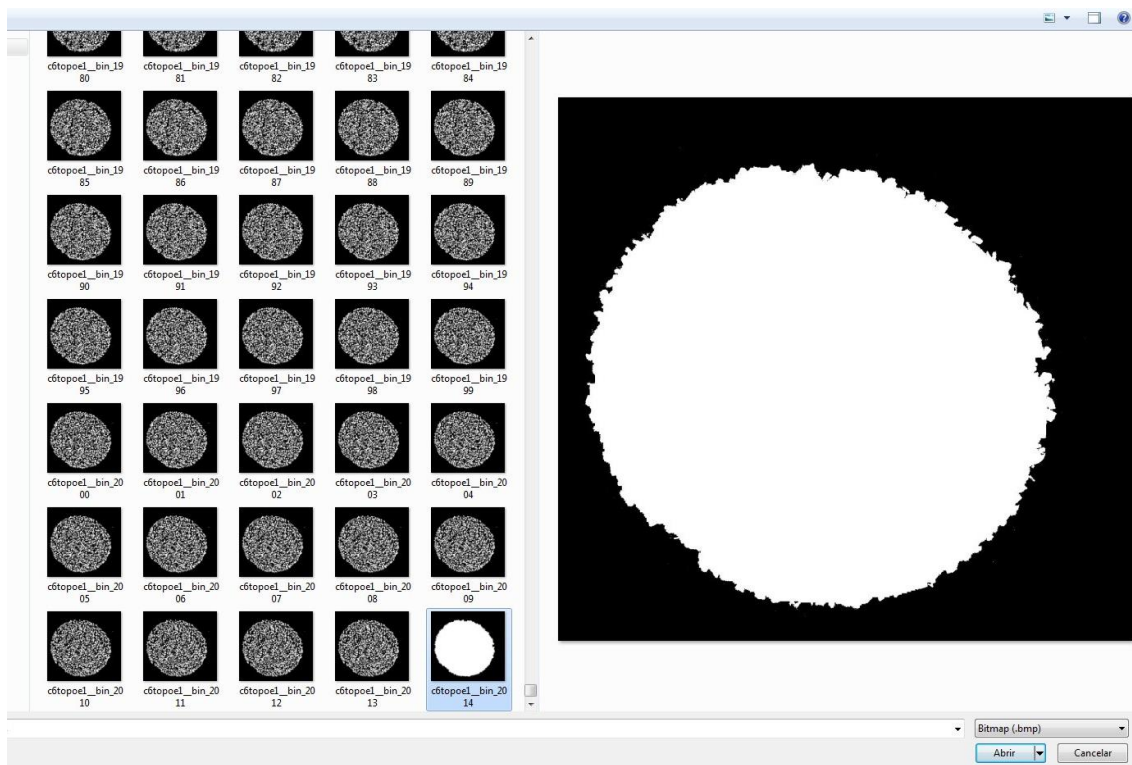
A nova ROI foi então definida em função das imagens binárias geradas e esse procedimento é apresentado na Figura 80.



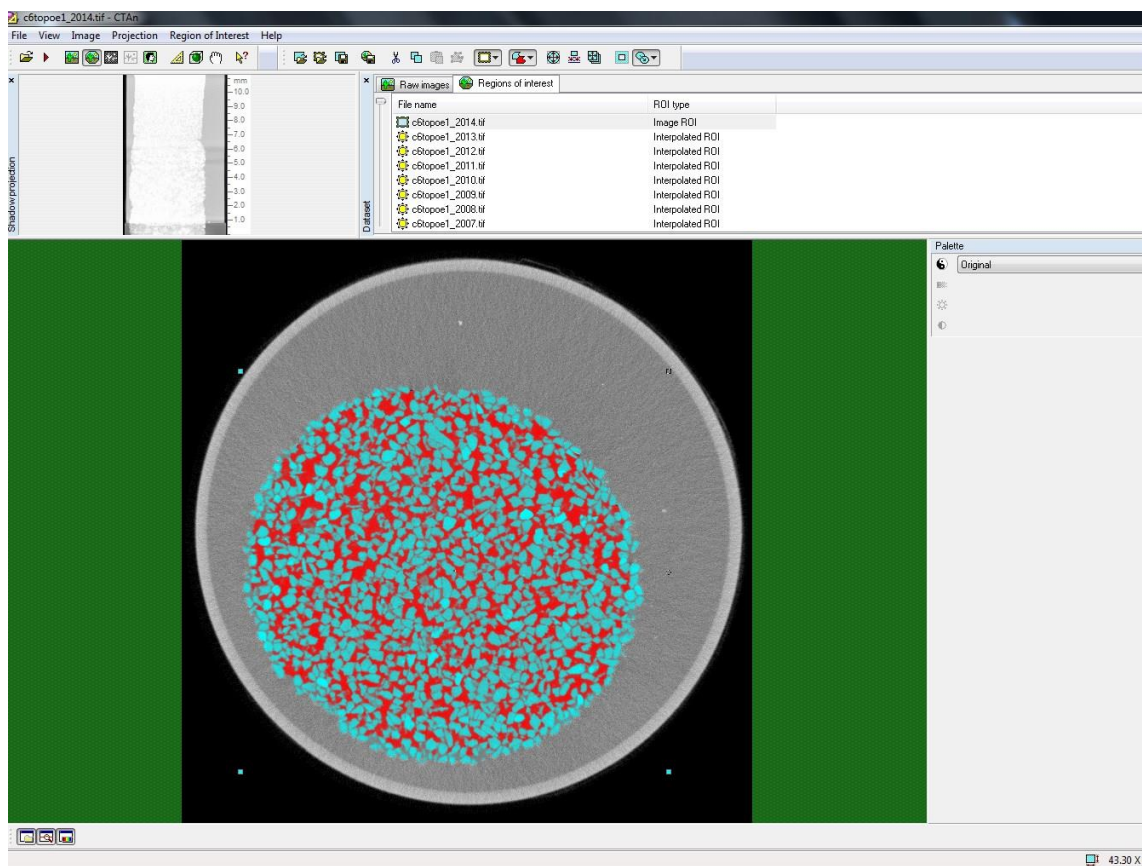
a) ROIs ainda não determinadas



b) Determinação de fatias estratégicas para a utilização das imagens binárias na definição das ROIs



c) Seleção da imagem binária referente à seção definida



d) ROI delimitada pela imagem binária

Figura 80: Procedimentos para geração da ROI utilizada na quantificação da porosidade

As ferramentas do *software* CTan que foram utilizadas para a estimativa dos valores de porosidade das colunas granulares está explicitada no Anexo I. Para isso foi realizada uma análise tridimensional. Esses valores são apresentados na Tabela 7 com o respectivo índice de vazios referente ao valor de porosidade encontrado.

Tabela 7: Valores de porosidade e índice de vazios da coluna granular de cada amostra ensaiada

Amostragem	Porosidade (%)	e
Coluna 6 – Topo	25,85	0,34
Coluna 6 – Base	29,00	0,41
Coluna 1 – Topo	21,96	0,28
Coluna 1 – Base	24,83	0,33

Segundo Carrier (2003), é possível correlacionar a porosidade do meio com o valor de condutividade hidráulica pela fórmula de Kozeny-Carman. Considerando-se o fluído como água a 20°C, essa fórmula pode ser simplificada, onde a condutividade hidráulica varia com o índice de vazios (e) e a superfície específica da área em função do volume de grãos (S_0) como mostra a Equação 5. O valor de S_0 leva em consideração a forma das partículas e a distribuição granulométrica do solo em questão.

$$k = 1,99 \times 10^4 \left(\frac{1}{S_0^2} \right) \left[\frac{e^3}{(1 + e)} \right] \quad (5)$$

Para finalidade de confirmar o uso da tomografia para obtenção da condutividade hidráulica, foi realizada uma análise mais simplificada dessa correlação. Considerando-se que os grãos do solo são esferas de tamanho uniforme, a correlação obedece à Equação 6, onde D é o diâmetro dos grãos esféricos de tamanho uniforme.

$$k = 552D^2 \left[\frac{e^3}{(1+e)} \right] \quad (6)$$

A Figura 81 apresenta os valores de condutividade hidráulica obtidos a partir da Equação 6 e a Figura 82 apresenta a mesma curva da Figura 81 em maior escala, como também o valor da condutividade hidráulica da Coluna 1 – Topo obtido através do ensaio de permeabilidade em um permeômetro de parede rígida empregando o método da carga constante.

Os resultados apresentados na Figura 81 sugerem a existência de uma correlação entre o valor determinado em laboratório e os obtidos a partir da Equação 6.

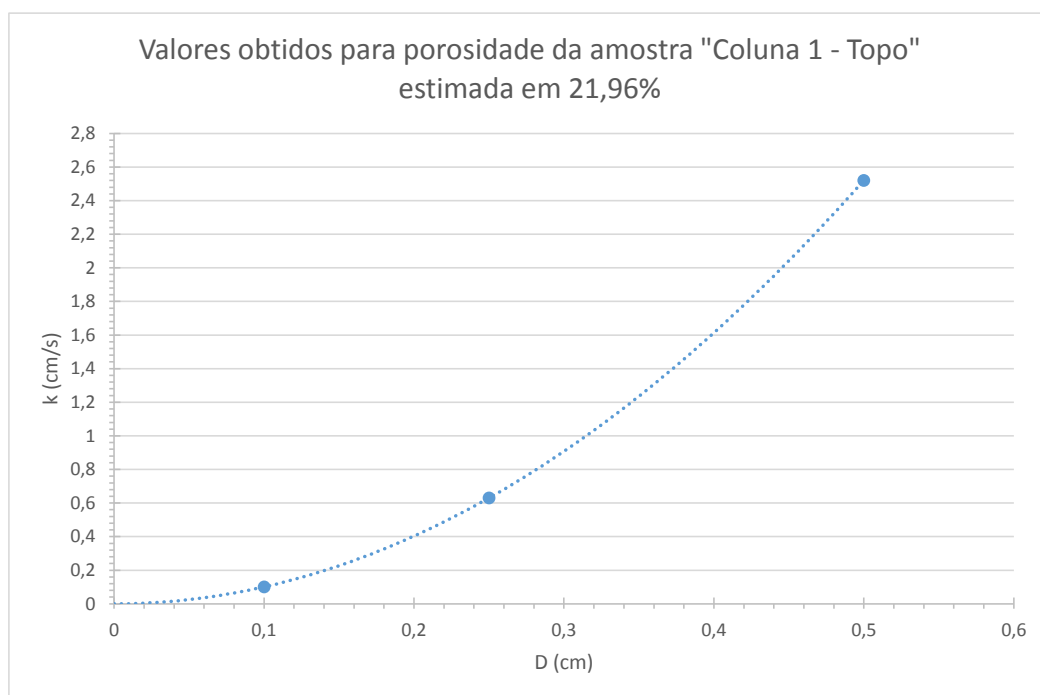


Figura 81: Correlação entre valores de condutividade hidráulica em função do diâmetro dos grãos obtidos a partir do valor de porosidade estimado na tomografia da amostra Coluna 1 – Topo.

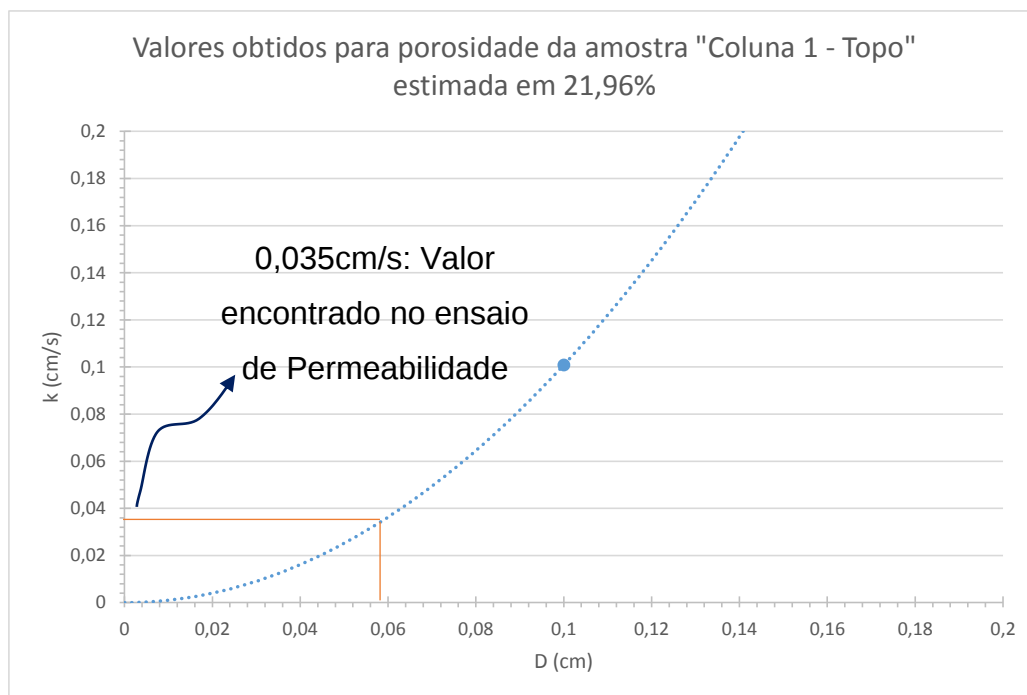


Figura 82: Aproximação da curva da Figura 81 e explicitação do valor encontrado no ensaio de condutividade hidráulica realizado na mesma amostra.

4.1. Quantificação do diâmetro e do centroide da coluna granular

Utilizando a mesma ROI delimitada para a quantificação da porosidade, foi realizada a análise em duas dimensões obtendo-se os dados de área da ROI, posição do centroide da ROI em y e posição do centroide da ROI em x , a cada fatia. A partir da área obtida foi calculado o diâmetro equivalente e os dados do diâmetro equivalente e da posição do centroide da ROI de cada fatia nas direções x e y são apresentados nas Figuras 83, 84 e 85, respectivamente.

Na Figura 83 é possível observar que na coluna 6, entre as cotas 170mm e 180mm há uma redução no diâmetro da coluna granular, chegando a 36mm de diâmetro já na coluna 1 é possível observar um aumento da seção de 38,3mm a uma profundidade de 140mm para 38,9mm a uma profundidade de 175mm, caracterizando um leve abaulamento com 1,65% de aumento. Pode-se observar também que tanto na coluna 6 quanto na coluna 1, há a redução da seção transversal com a proximidade da ponteira drenante.

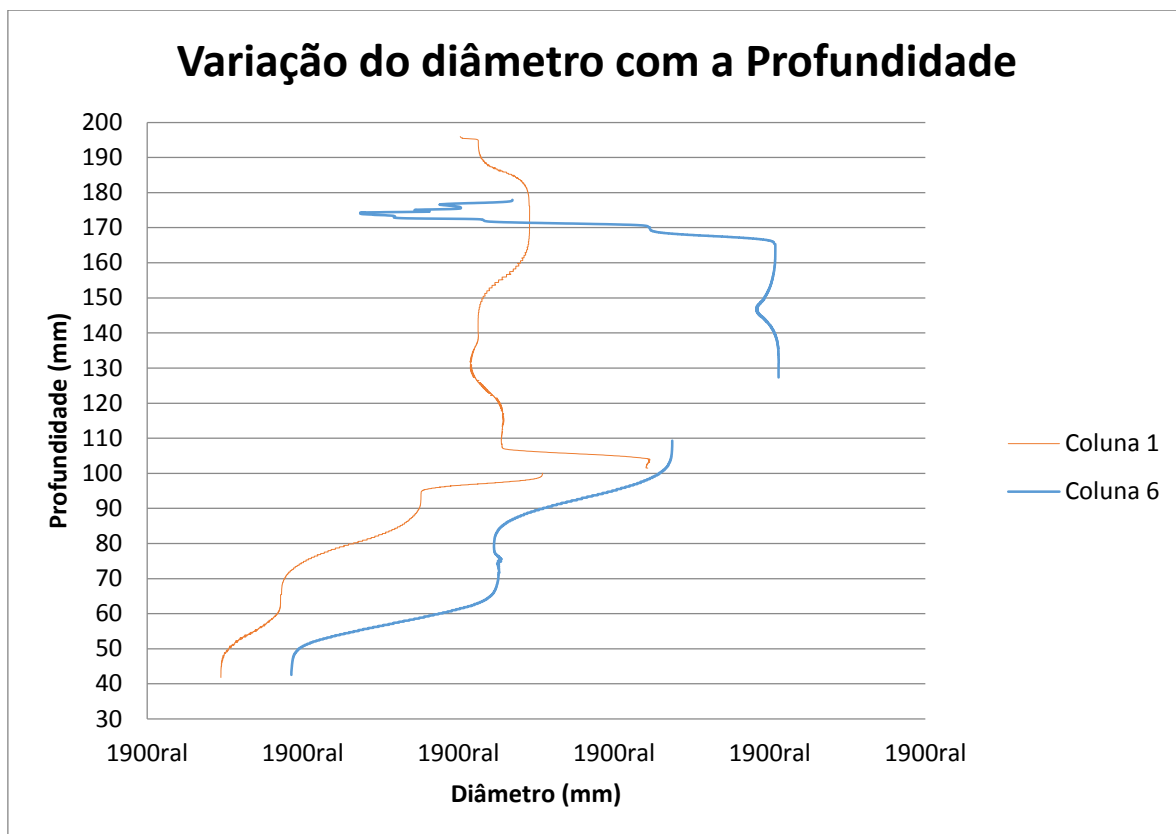


Figura 83: Variação do diâmetro com a profundidade das colunas 1 e 6.

A respeito da variação do centroide, nos gráficos apresentados nas Figuras 84 e 85 pode-se analisar o posicionamento global da coluna granular e sua inclinação. A respeito da variação do centroide na direção x é possível observar na coluna 1 uma intensa inclinação para a esquerda, bem como um posicionamento global mais próximo da extremidade direita da amostragem, se comparado a coluna 6. Ainda na coluna 1 é possível observar que na região de descontinuidade, próximo a altura de 100mm, onde encontram-se as regiões limítrofes da amostragem, houve um deslocamento do centroide para a esquerda, o que pode ser explicado pelo amolgamento devido a separação dos amostradores. Na coluna 6 é possível observar que ela sofreu relativamente pouca inclinação, com um leve pico de deslocamento para a esquerda na região entre as profundidades 170mm e 180mm.

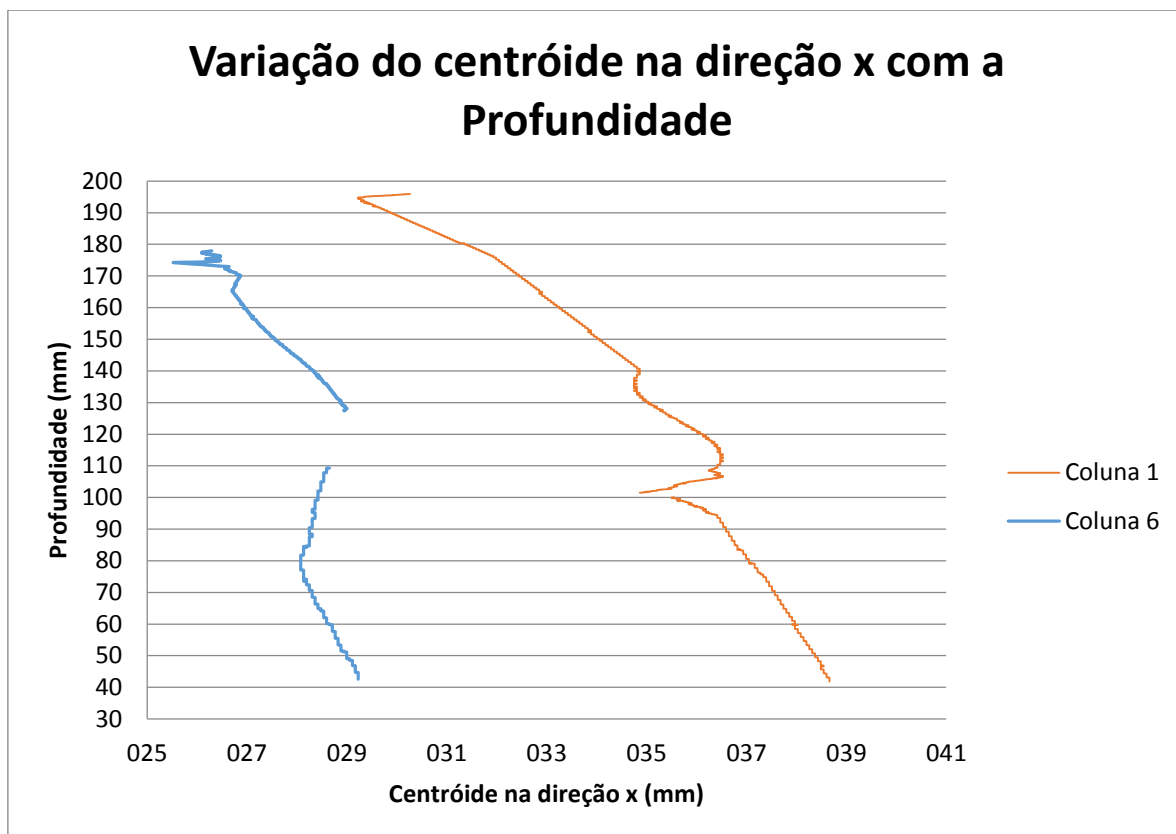


Figura 84: Variação do centróide na direção x com a profundidade das colunas 1 e 6.

Em relação a variação do centróide no sentido do eixo y, pode-se observar na Figura 85 que na região superior da coluna 1, acima da cota 140mm, houve uma intensa inclinação para a esquerda, o que não continuou na metade inferior dessa coluna. Também é possível observar que entre as cotas 170mm e 180mm, a coluna 6 sofreu um pico de deslocamento para a direita. Também é possível constatar a partir da Figura 85 que a coluna 6 ficou mais deslocada globalmente para a direita.

Comparando as análises quantitativas com as análises qualitativas realizadas no item 4.1 pode-se observar equivalências satisfatórias das características analisadas.

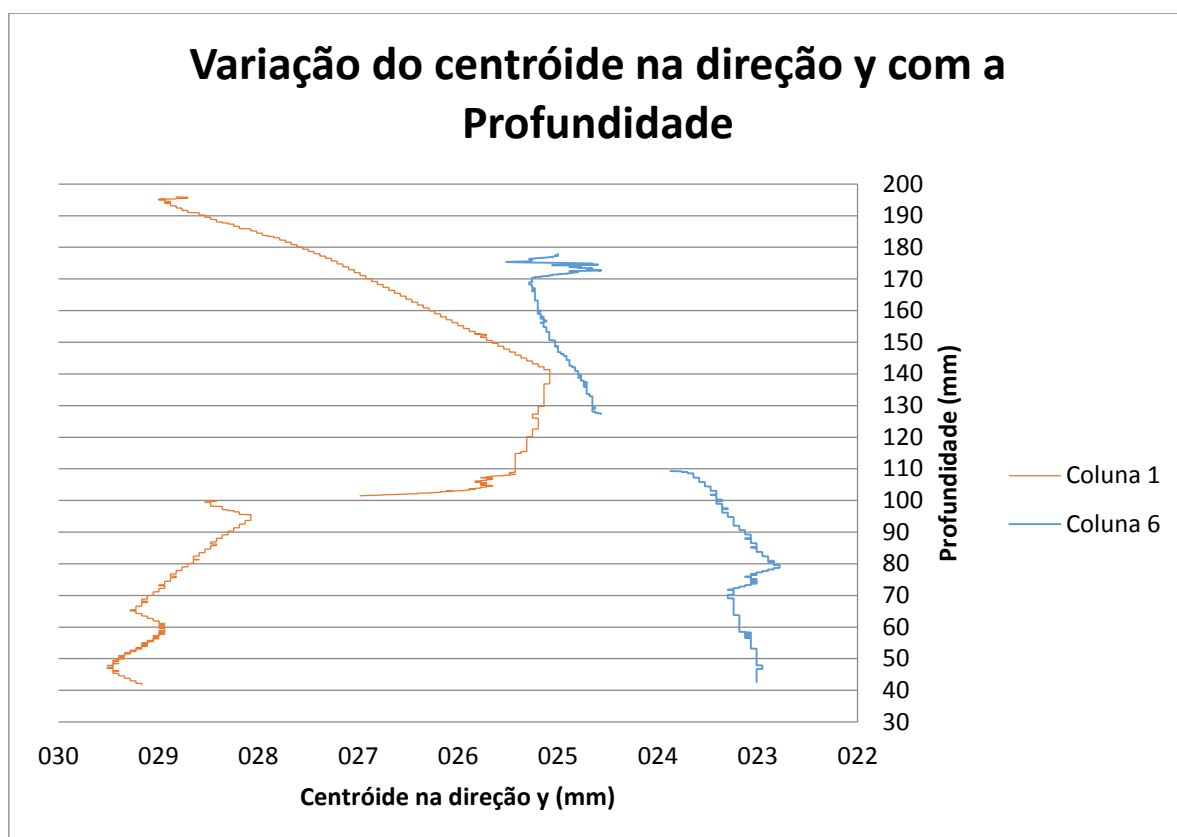


Figura 85: Variação do centróide na direção y com a profundidade das colunas 1 e 6.

CAPÍTULO 5.

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo analisar as possibilidades do uso da tomografia de raio-X para verificação da ocorrência de condicionantes ao desempenho de colunas de brita modeladas em centrífuga geotécnica. A verificação desses condicionantes pode ser extremamente útil para auxiliar na interpretação dos resultados obtidos da instrumentação realizada durante o carregamento em voo.

Para isso foi desenvolvido um sistema de amostragem onde é usado um amostrador de PVC de parede fina que permite que os raios-X atravessem sua parede sem perdas significativa de energia. Devido à inerência do material que compõe o amostrador ao raio-X, não se fez necessária a extração da amostra do amostrador, evitando o amolgamento e outras interferências.

Neste trabalho foi possível verificar a possibilidade do uso dessa ferramenta para a identificação de características relacionadas à morfologia da estrutura que podem afetar o desempenho da coluna como estrutura de reforço. Nessa vertente, observam-se características como presença de bulbos, redução da seção transversal posicionamento da ponteira e inclinação da coluna.

Também foi possível identificar particularidades pertinentes ao desempenho da coluna granular como dreno vertical, como por exemplo a presença de colmatção de toda a seção da coluna em pequenos trechos, identificação da região de penetração dos finos da *smear zone*, quantificação da porosidade da coluna granular possibilitando a correlação com a condutividade hidráulica dessa região.

Além de atributos diretamente relacionados ao desempenho da coluna como dreno vertical ou reforço, também foi possível identificar problemas relacionados ao processo construtivo da coluna granular no modelo reduzido,

como por exemplo, a acomodação irregular da ponteira na camada drenante e segregação do material granular usado como brita.

É importante ressaltar que a exatidão dos dados retirados das interpretações e quantificações obtidas das imagens formadas pela tomografia depende da resolução dessas imagens e do uso correto de ferramentas disponíveis no *software* por parte do operador. No que diz respeito à resolução, quanto maior ela for, maior será o período necessário para aquisição da tomografia, mais laborioso será o processamento dos dados e maiores serão os requisitos do equipamento onde será realizado o processamento. Portanto deve-se ponderar a melhor maneira de obter as informações necessárias de forma que atenda a uma relação de custo e benefício satisfatória.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Quanto ao sistema construtivo das colunas granulares para o ensaio em centrífuga, sugere-se a realização de estudos relacionados à melhora dos procedimentos de construção de colunas granulares em modelagem reduzida, tanto com o objetivo de garantir o descolamento da ponteira de forma uniforme, quanto com o objetivo de evitar a segregação do material granular na coluna.

Já no que diz respeito ao sistema de amostragem, verificou-se que há dificuldade em manter a simetria entre as colunas, portanto uma sugestão de trabalhos futuros é o desenvolvimento de um sistema de amostragem que dê certo grau de liberdade na guia que garante a verticalidade do amostrador, para que seja possível cravar os amostradores ao mesmo tempo, contando com a existência de assimetria entre as colunas.

No âmbito da aplicação da tomografia para estudos relacionados à modelagem reduzida de colunas de brita, sugere-se a realização de estudos mais aprofundados que relacionem valores de porosidade com a condutividade hidráulica, a influência da granulometria na variação da região de penetração dos finos da *smear zone* e também para estimar a distribuição granulométrica do material da coluna granular como um todo, ou de regiões específicas.

Referências Bibliográficas

- Almeida, M.S.S. (1984). Stage Constructed Embankments on Soft Clays. Tese (PhD em Engenharia Civil), Inglaterra, Cambridge University.
- Almeida, M. S. S., Marques, M. E. S. (2010). *Aterros sobre solos moles - projeto e desempenho*. 1 ed. São Paulo: Editora Oficina de texto. 254p.
- Almeida, Ricardo F. R. (2011) *Modelagem Geológica do entorno da lagoa de Jacarepaguá*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro – RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, 175p.
- Alves, H. D. L. (2015) *Metodologia de Microtomografia Computadorizada com Dupla Energia para Caracterização Mineralógica de Rochas*. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear). Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 93p.
- Ambily, A. P., Gandhi, S. R. (2007) Behavior of Stone Columns Based on Experimental and FEM Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4): 405-415
- Aslam, R., Ellis, E. A. (2010). Centrifuge modelling of piled embankments. *Physical Modelling in Geotechnics*. (1):1297-1302.
- Babu, M. D., Nayak, S., Shivashankar, R. (2013). A Critical Review of Construction, Analysis and Behaviour of Stone Columns. *Geotech Geol Eng*, 31:1-22.
- Barksdale, R. D., Bachus, R. C. (1983). *Design and Construction of Stone Columns Vol.1*. Washington: FHWA/RD – 83/026. 210p.
- Baudouin, G., Thorel, L., Rault, G. (2010). 3D load transfer in pile supported earth platforms over soft soils centrifuge modeling. *Physical Modelling in Geotechnics*. (1):1303-1308.

- Blanc, M., Rault, G., Thorel, L., Almeida, M. (2013). Centrifuge investigation of load transfer mechanisms in a granular mattress above a rigid inclusions network. *Geotextiles and Geomembranes*. 36:92-105.
- Blanc, M., Rault, G., Thorel, L., Almeida, M. S., Almeida, M. C. (2012). Centrifuge investigation of the load transfer mechanism above rigid inclusions. *Eurofuge 2012*, Delft: Delft University of Technology and Deltares. p. 511 – 516.
- Bouckaert, L., Loo, D. V., Ameloot, N., Buchan, D., Hoorebeke, L. V., Sleutel, S. (2013). Compatibility of X-ray micro-Computed Tomography with soil biological experiments. *Soil Biology & Biochemistry*. 56:10-12.
- Burger e Burge (2009) (Tomografia) – pág 57
- Carrier, W. D. (2003). “Goodbye, Hazen; hello, Kozeny-Carman.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(11), 1054–1056.
- Cardoso, P. (2010) *Estudo Experimental do Arrancamento de Dutos Enterrados Ancorados com Geogrelhas, Utilizando Centrífuga Geotécnica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 101p.
- Caruso Jr., F., Cunha, H. C. S., Dios, F. R. B. (2001) Cenozoico/Quaternário. *In: Luiz Carlos da Silva e Helio Canejo da Silva Cunha, Geologia do Estado do Rio de Janeiro*. 2ed. Brasília: CPRM, 69-75.
- Castro, J., Cimentada, A., Costa, A. d., Cañizal, J., Sagaseta, C. (2013). Consolidation and deformation around stone columns Comparison of theoretical and laboratory results. *Computers and Geotechnics*. 49:326-337.
- Dewanckele, J., Kock, T. D., Boone, M. A., Cnudde, V., Brabant, L., Boone, M. N., Fronteau, G., Hoorebeke, L. V., Jacobs, P. (2012) 4D imaging and quantification of pore structure modifications inside natural building stones by means of high resolution X-ray CT. *Science of the Total Environment*, 416: 436–448
- Domingues, D. L. P. (2011) *Caracterização Geológica e Geomecânica de Travertinos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro – RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, 315p.

- Dominoni, C. M. (2011). *Análise de Estabilidade e compressibilidade de um aterro sobre solo mole no porto de Suape, região metropolitana de Recife*. Projeto de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 102p.
- Fichtner (2008a). "Test Field 'Stone Columns' - Iron Ore Stock Yard – Raw Material Handling (RMH) - Measurement and Results". Relatório Técnico FICHTNER - Smolczyk & Partner. Rio de Janeiro. Brasil. p 68.
- Fichtner (2008b) "Quality Assurance – Check of Geometrical Dimensions and Grain Size Analyses of the Stone Columns Raw Material Handling (RMH). Stock Yard" Relatório Técnico FICHTNER - Smolczyk & Partner. Rio de Janeiro. Brasil. p 16.
- Futai, M. M. (2010) *Considerações sobre a influência do adensamento secundário e do uso de reforços em aterros sobre solos moles*. Tese (Livre Docência apresentada ao Departamento de Estruturas e Geotecnia). São Paulo – SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 197p.
- Gautray, J., Laue, J., Springman, S. M., Almeida, M. S. (2013). Development of pore water pressure around a stone column. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Paris, p. 915 – 918.
- Gonzalez, R. C., Woods, R. E. (2010) *Processamento Digital de Imagens*. 3 ed. São Paulo: Person Prentice Hall. 624p.
- Guetif, Z., Bouassida, M., Debats, J. M. (2007) Improved soft clay characteristics due to stone column installation. *Computers and Geotechnics*, 34: 104-111.
- Hall, S. A., Bornert, M., Desrues, J., Pannier, Y., Lenoir, N., Viggiani, G., Bésuelle, P. (2010) Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray _CT and volumetric digital image correlation. *Géotechnique*, 60(5): 315–322
- Hettler, A. (2010). Possibilities and limitations of 1-g model techniques. *Physical Modelling in Geotechnics*. (1):135-140.

- Hu, Wei. (1995) *Physical modelling of group behaviour of stone column foundations*. Dissertation (Degree of Doctor of Philosophy). Glasgow, University of Glasgow, 313p.
- Hu, W., Wood, D. A., Stewart, W. (1997) Ground Improvement Using Stone Columns Foundations: Result of Model Test. *International Conference on Ground Improvement Techniques*, 247-256
- Kawaragi, C., Yoneda, T., Sato, T., Kaneko, K. (2009). Microstructure of saturated bentonites characterized by X-ray CT observations. *Engineering Geology*. 106:51-57.
- Lambe, T., Whitman, E. V. (1969) *Soil Mechanics*. New York: J. Wile. 553p
- Lima, B. T. (2012). *Estudo do uso de colunas de brita em solos argilosos muito moles*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 314p .
- Loo, D. V., Bouckaert, L., Leroux, O., Pauwels, E., Dierick, M., Hoorebeke, L. V., Sleutel, S. (2014). Contrast agents for soil investigation with X-ray computed tomography. *Geoderma*. 213:485-491.
- Ma, X. F., Hou, H. J., Cai, Z. Y., Xu, G. M. (2014). Centrifuge modelling of geotechnical processes in soft ground using pragmatic approaches. *Physical Modelling in Geotechnics*. (1):139-151.
- Melo, C. D. (2010). *Avaliação de Desempenho e Desenvolvimento de Metodologias para Estudos de Ancoragem de Estruturas Flutuantes com Estacas de Sucção*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 162p.
- Okay, U. S., Dias, D., Thorel, L., Rault, G. (2014). Centrifuge Modeling of a Pile-Supported Granular Earth-Platform. *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*. 140(2):
- Ortigão, J. A. (2007). *Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora. 385p.

- Penereiro, J. C. (2010) Algumas Considerações De Galileo A Respeito Das Teorias Da Semelhança Física, Da Resistência Dos Materiais E Das Flexões. *Caderno Brasileiro De Ensino De Física*, 27(2): 288-312.
- Pico, R. L. H. (2013) *Influência da microestrutura nas propriedades mecânicas de rochas carbonáticas usando imagens 3D de microtomografia de raios-X*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro – RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, 167p
- Rackwitz, F., Schubler, M. (2010). 1g model test on granular soil columns for ground improvement of very soft soil. *Physical Modelling in Geotechnics*, (2): 1351-1356.
- Saboya, F., Tibana, S., Martins Reis, R., Ramires, S.R., Brum, S., Montero del Aguila, V., Domingos Vieira, J. (2010) The UENF geotechnical centrifuge facility. *Physical Modelling in Geotechnics*, London, (1)273-278
- Soares, J. D. (1997). *Estudo do comportamento geotécnico do depósito de argila mole da grande Porto Alegre*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Porto Alegre-RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 300p
- Taylor, R. N. (1995) *Geotechnical Centrifuge Technology*. Blackie Academic & Professional. 1ed.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. (1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2ed. New York: John Willey & Sons. 729p.
- Thorel, L., Rault, G., Garnier, J., Murillo, C., Gaudicheau, P., Neel, A., Favraud, C. (2008) Macrogravity measurements on reduced-scale models of geotechnical structures. *British Library Public Catalogue*, 273:93-131.
- Vekli, M., Aytekin, M., Ikizler, S. B., Çalik, U. (2012) Experimental and numerical investigation of slope stabilization by stone columns. *Nat Hazards*. 64:797-820
- Weber, T.M. (2004). Development of a sand compaction pile installation tool for the geotechnical drum centrifuge. *XVI European Young Geotechnical Engineer's Conference*, Vienna, Austria. 391-400.

- Weber, T. M., Laue, J., Springman, S. M. (2006). Centrifuge modeling of sand compaction piles in soft clay under embankment load. *Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, (1): 603-608
- Weber, T., Plotze, M., Laue, J., Peschke, G., Springman, S. (2010). Smear zone identification and soil properties around stone columns constructed in-flight in centrifuge model tests. *Géotechnique*, 60(3): 197–206.
- Wood, D. M., Hu, W., Nash, D. F. T. (2000) Group Effects in stone columns foundations: Model tests. *Géotechnique*, 50(6): 689–698.
- Yi, J. T., Goh, S. H., Lee, F. H. (2010). Centrifuge study on the “set-up” effect induced by sand compaction pile installation. *Physical Modelling in Geotechnics*, (2):1383-1388.

Anexo I

Com o objetivo de esclarecer pormenores acerca das ferramentas do *software* Ctan utilizadas nas análises quantitativas, a Figura 1 apresenta o fluxograma referente as etapas da rotina estabelecida para o processamento, independente da informação que se pretendesse obter. Para a extração de cada informação foi utilizada a mesma ROI, delimitando somente a coluna granular como região de interesse. O que varia em função do dado que se deseja obter é a delimitação do histograma e as ferramentas utilizadas na obtenção dos dados de morfometria.

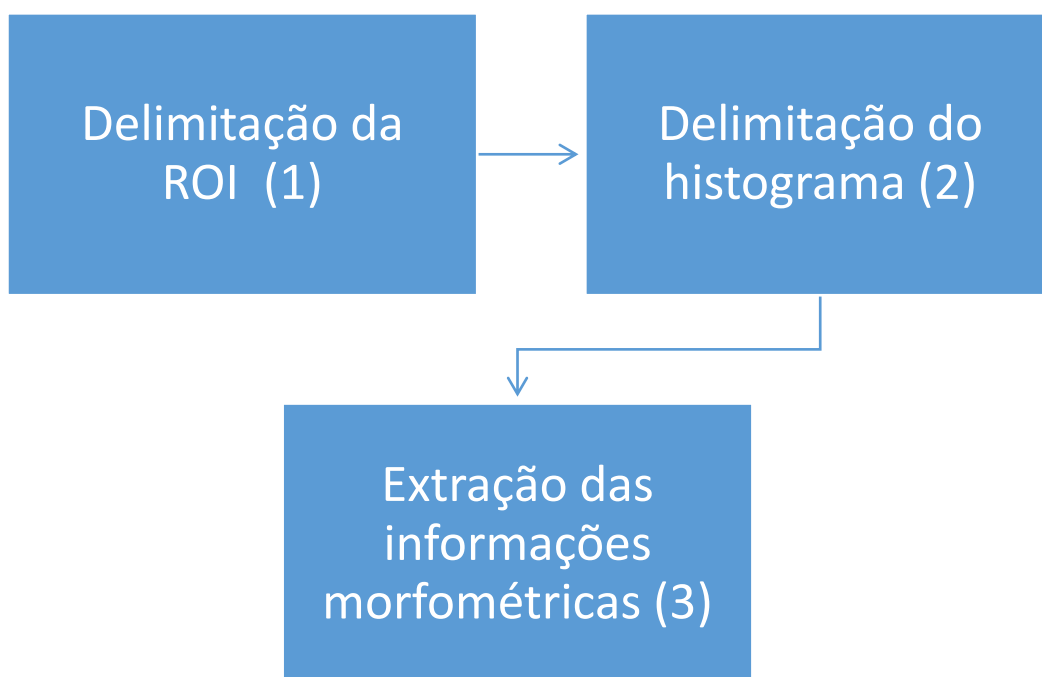


Figura 1: Fluxograma da rotina de processamento.

Cada uma das etapas apresentadas no fluxograma são executadas nas abas do *display* superior do *software*, que são ressaltadas na Figura 2.

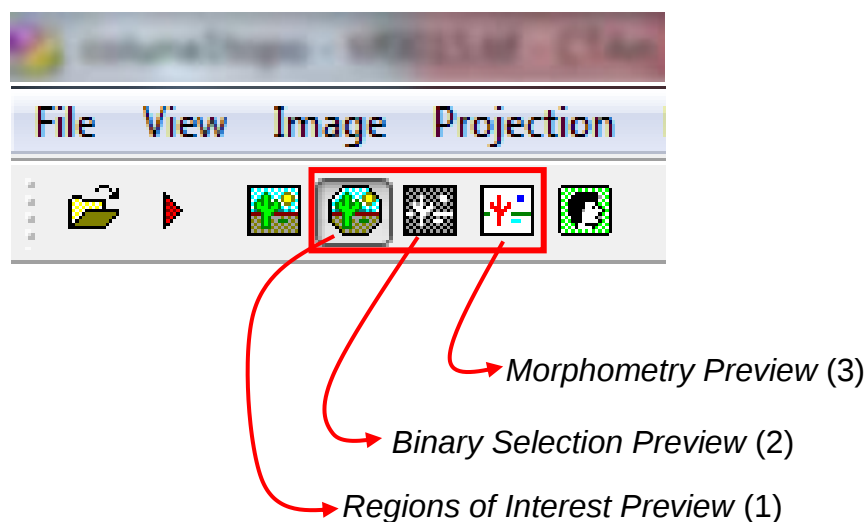


Figura 2 : Abas do *display* superior do *software*.

Como a etapa 1 é a mesma para todos os casos analisados e já foi explicitada no corpo do texto, no item 4.3, neste anexo serão explicados os detalhes a partir da etapa 2.

Na etapa 2 deve ser delimitado o histograma que definirá o que é vazio do que é sólido. Para a quantificação de porosidade é necessário delimitar, no histograma, o índice que representa vazios do que representa sólido e na quantificação de características de diâmetro e centroide é necessário que toda a coluna seja considerada como um corpo maciço.

A manipulação da delimitação do histograma é realizada através do cursor da barra de rolagem horizontal inferior. Na Figura 3 é apresentado o histograma da camada analisada, a barra de rolagem horizontal e o cursor.

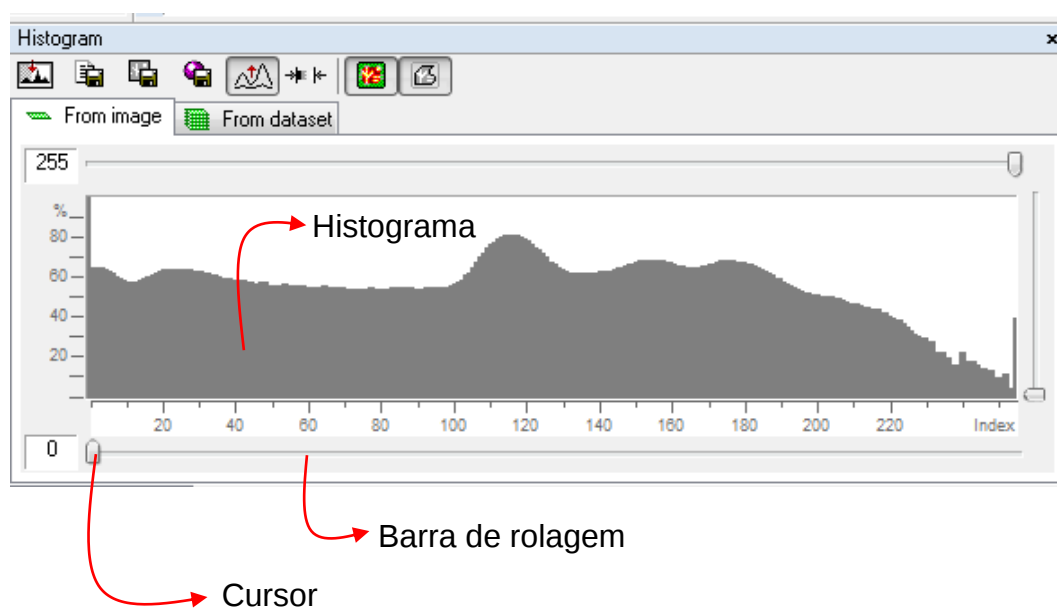


Figura 3: Histograma sem ajustes.

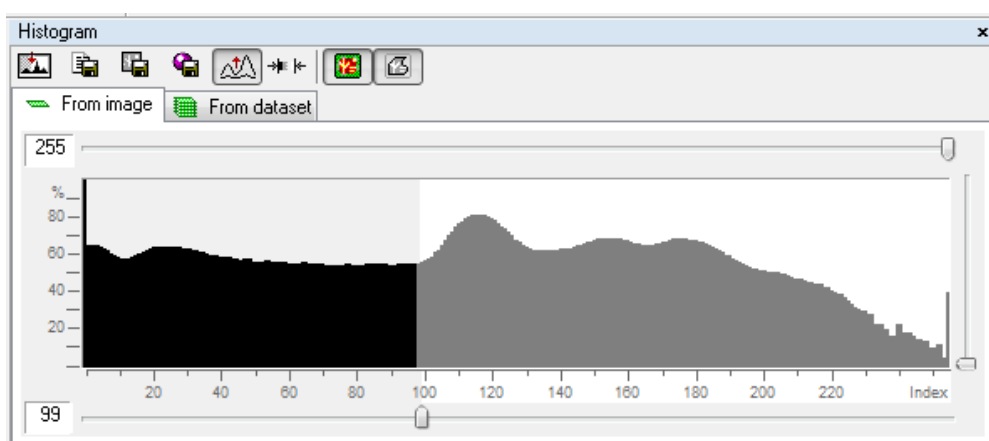


Figura 4: Histograma ajustado para quantificação de porosidade.

Para o procedimento de quantificação de porosidade o cursor foi movimentado até que todo o vazio estivesse desmarcado no histograma como mostra a Figura 4, já no caso em que toda a ROI deve ser considerada como maciço, somente o índice do primeiro pico do histograma é desmarcado como mostra a Figura 5.

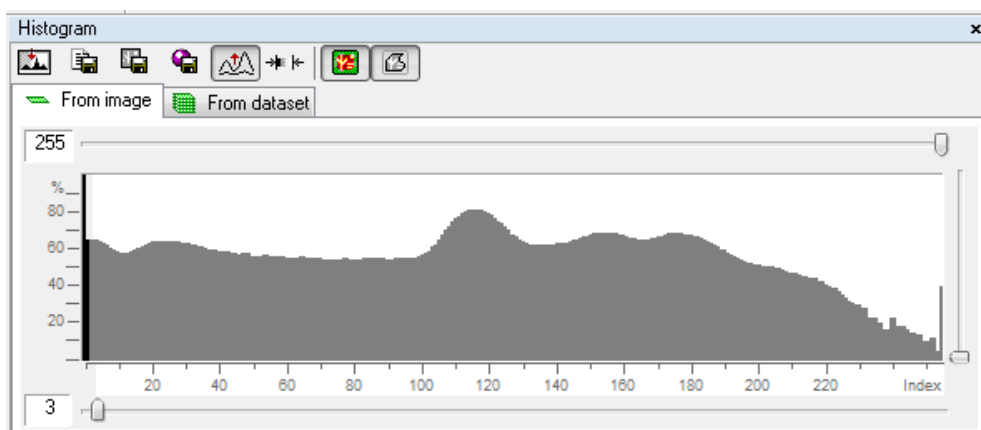


Figura 5: Histograma ajustado para quantificação de diâmetro e centróide.

Na etapa 3 do procedimento são realizadas as análises morfológicas e os resultados são exportados em formato de planilha. Na aba de análises (*Analysis*) existem diversas formas de exportar os dados obtidos nas etapas anteriores. As duas formas de obtenção dos resultados que foram obtidas neste processamento foram as ressaltadas na Figura 6.

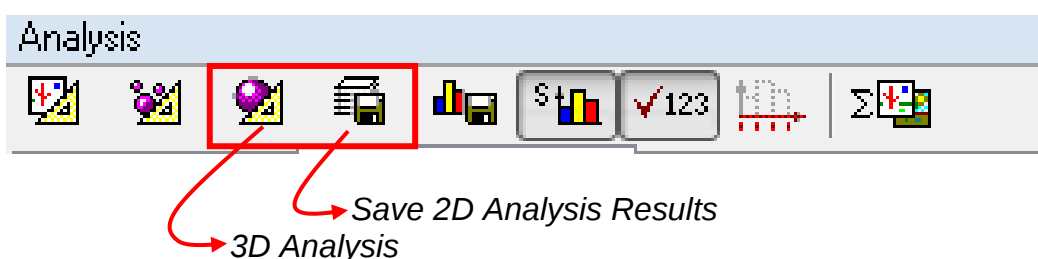


Figura 6: Barra de exportação de dados da análise de morfometria.

Os dados de porosidade foram obtidos considerando-se a análise tridimensional, utilizando-se, portanto, a ferramenta 3D Analysis. Como resultado de saída foi obtido um único valor de porosidade para cada amostra analisada. Já para a quantificação do diâmetro e dos centroides foi realizada camada a camada em uma análise bidimensional, já que é de grande interesse conhecer a variação dessas características ao longo da profundidade. Portanto, a ferramenta utilizada neste caso foi a Save 2D Analysis Results, obtendo-se como resultado de saída valores de área e posicionamento do centroide a cada profundidade. Os dados obtidos foram então organizado em planilhas de modo que fosse possível gerar os gráficos para interpretação e análise.