



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Caracterização das propriedades físicas de solo Arenítico da Formação Botucatu – na  
Região da Cidade de Bofete - SP**

**JOÃO CARLOS CORRÊA**

**Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Ciências na Área  
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:  
Profa. Dra. Margarida Mizue Hamada**

**São Paulo  
2019**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Caracterização das propriedades físicas de solo Arenítico da Formação Botucatu – na  
Região da Cidade de Bofete - SP**

**Versão Corrigida**

**Versão Original disponível no IPEN**

**JOÃO CARLOS CORRÊA**

**Dissertação apresentada como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de  
Mestre em Ciências na Área  
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora  
Profa. Dra. Margarida Mizue Hamada**

**São Paulo  
2019**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,  
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

CORRÊA, J. C. **Caracterização das propriedades físicas de solo Arenítico da Formação Botucatu – na Região da Cidade de Bofete - SP**. 2019. 56 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Corrêa, João Carlos  
Caracterização das propriedades físicas de solo Arenítico  
da Formação Botucatu - na Região da Cidade de Bofete - SP /  
João Carlos Corrêa; orientadora Margarida Mizue Hamada. -- São  
Paulo, 2019.  
56 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. Arenito Botucatu. 2. Rocha reservatória. 3. Quartzo. I.  
Hamada, Margarida Mizue, orient. II. Título.

*“Não te mandei eu?  
Esforça-te, e tem bom  
ânimo; não temas, nem te  
espantes; porque o Senhor  
teu Deus é contigo, por  
onde quer que andares”.*  
**Josué 1:9**

## **AGRADECIMENTOS**

À Dra. Margarida Mizue Hamada pelo grande apoio, amizade e orientação constantes e muito valiosas, bem como pelo exemplo de pessoa e de profissional da ciência.

Ao Dr. João Francisco Trencher pelo grande apoio, incentivo e ótimas discussões.

Ao Dr. Francisco de Assis Cavallaro pelo auxílio com as análises processuais de geologia e geotecnia, pelo grande apoio, incentivo e ótimas discussões.

Ao Dr. Rafael H. L. Garcia do Centro de CECON do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pelas medidas de Difração e Fluorescência de Raios X e MEV e valiosas discussões para a interpretação dos resultados.

Ao Dr. Alexandre França Velo da área de Processamento de sinais e imagens de tomografia computadorizada, Instrumentação nuclear, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pelas imagens de tomografia computadorizada e valiosas discussões para a interpretação dos resultados.

Ao Centro de Tecnologia das Radiações do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela infraestrutura cedida, fundamental para a realização deste trabalho.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear pela projeção e intercâmbio acadêmico e científico que me foram proporcionados.

Aos meus amigos do IPEN pela amizade inspiradora.

À minha querida mãe Neli Ribeiro Corrêa pelo apoio incondicional e amoroso, minha filha amada Esther Fabbre Corrêa pelo apoio e motivação, minha irmã Maria Regina Corrêa Felizardo, seu esposo Gilberto Felizardo e minha sobrinha Larissa Corrêa Felizardo pelo apoio em todo o tempo e minhas tias Seli Ribeiro de Oliveira e Zeli Ribeiro de Souza pelo apoio e incentivo constante.

## RESUMO

CORRÊA, João C. **Caracterização das propriedades físicas de solo Arenítico da Formação Botucatu – na Região da Cidade de Bofete - SP.** 2019. 80p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

O Desenvolvimento humano sempre foi galgado pela utilização dos recursos naturais encontrados, porém nem sempre de maneira ordenada e correta. Um dos principais recursos utilizados pela humanidade é a água, que vem sendo retirada dos grandes aquíferos, tais como o Aquífero Guarani, que se localiza no território centro-sul da América do Sul, incluindo em seu traçado, países como Brasil, Argentina e Paraguai, de forma a comprometer a sustentabilidade do uso deste recurso com o risco de subsidência ou acomodação das camadas do sub-solo, devido à exploração de água destes reservatórios. Este fenômeno precisa ser analisado e caracterizado com bastante cuidado para prevenir ou mitigar acidentes ou incidentes em edificações e pavimentos. Em virtude da complexidade e heterogeneidade de suas estruturas e composições de acordo com sua localização, este trabalho tem o intuito de ampliar o conhecimento sobre a rocha do reservatório da Formação Botucatu, utilizando diferentes técnicas para sua caracterização, como ensaios geotécnicos, microscópio eletrônico de varredura, fluorescência e difração de raios X e tomografia computadorizada de terceira geração.

A taxa de cisalhamento ( $V_s$ ) foi associada a diferentes parâmetros da rocha, como densidade seca, índice de vazios, teor de umidade, grau de saturação e porosidade. O coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) obtido no teste foi de  $3,34E-04$  cm/s e é consistente com o valor do solo arenítico, proveniente da rocha do reservatório. O teste para obtenção do limite de plasticidade indicou que o solo rochoso avaliado não é plástico. O arenito analisado pela técnica de fluorescência de raios X é predominantemente composto por  $SiO_2$  (76%) e  $Al_2O_3$  (20%), seguido por  $Fe_2O_3$  (2,3%). Nos difratogramas de raios X, as amostras do arenito apresentaram picos relativos de  $SiO_2$  e  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$  corroborando os resultados obtidos nas medições de fluorescência de raios X. Os estudos SEM mostraram que as rochas não apresentaram cimentação em suas estruturas, indicando que são rochas de reservatório, com potencial para armazenamento de água. Uma boa resolução foi encontrada para as imagens das rochas arenito Botucatu seca, úmida e úmida contendo bário. A distribuição das densidades das partículas das rochas foi apresentada no histograma construída pelas intensidades dos pixels das imagens

**PALAVRAS-CHAVE:** Arenito Botucatu, Exploração de água subterrânea, Sustentabilidade de aquíferos, Rocha reservatório

## ABSTRACT

CORRÊA, João C. **Characterization of the physical properties of sandstone soil of Botucatu formation - In the region of the city of Bofete - SP.** 2019. 80p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Human development has always been based on the use of natural resources found, but not always in an orderly and correct way. One of the main resources used by mankind is water, which has been withdrawn from large aquifers, such as the Guarani Aquifer, which is located in the south-central territory of South America, including Brazil, Argentina and Paraguay. It is important to take into account the sustainability in the use of this resource, face the risk of subsidence or accommodation of the subsurface layers, due to the exploitation of water from these reservoirs. This phenomenon needs to be analyzed and characterized with great care to prevent or mitigate accidents or incidents in buildings and pavements. The objective of this work is to improve the knowledge of the characteristics of the sandstone soil of Botucatu Formation by means of its physical and physicochemical properties. Our purpose is to contribute to the analysis procedure for the storage, in the form of reservoir, of fluids and instigate a discussion involving sedimentary aquifers to assist in the forecasting and simulation tools for scenarios, monitoring strategies and mitigation techniques. Due to the complexity and heterogeneity of its structures and compositions due to the location, this work aims to increase the knowledge about the Botucatu Formation reservoir sandstone rock, using different techniques for its characterization, such as geotechnical tests, optical microscopy (MO), electron scanning microscopy (SEM), X-ray Fluorescence and X-ray diffraction. The shear rate ( $V_s$ ) was associated with different rock parameters, such as dry density, void index, moisture content, degree of saturation and porosity. The permeability coefficient ( $k$ ) obtained in the test was of  $3.34E-04$  cm/s, and is consistent with the value of arenitic soil, originated from the reservoir rock. The test for obtaining the plasticity limit indicated that the evaluated rock soil is not plastic. The sandstone analyzed by the X-ray fluorescence technique is, predominantly, composed of  $SiO_2$  (76%) and  $Al_2O_3$  (20%), followed by  $Fe_2O_3$  (2.3%). As it may be seen in the X-ray diffractogram, the samples of the sandstone showed relative  $SiO_2$  and  $Al_2O_3/SiO_2$  peaks, corroborating the results obtained in the X-ray Fluorescence measurements. SEM studies showed that the rocks did not present cementation in their structures, indicating that they are reservoir rocks, with potential for water storage. A good spatial resolution was found for images of dry, wet and wet containing barium Botucatu sandstone rocks. The distribution of rock particle densities was presented in the histogram constructed by the image pixel intensities.

**KEY WORDS:** Arenito Botucatu, Groundwater Exploitation, Aquifer sustainability, Reservoir Rock

## Lista de Figuras

- Figura 01** - Ocorrência da formação Botucatu.
- Figura 02** - Mapa de potencialidade Aquífero Guarani com indicação das vazões exploráveis.
- Figura 03** - Mapa geológico simplificado da distribuição dos arenitos da Formação Botucatu e das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, na porção SW do Estado de São Paulo e norte do Paraná.
- Figura 04** - Reconstrução artística da Cuesta ou Serra de Botucatu.
- Figura 05** - Arenitos finos do sistema eólico seco Botucatu.
- Figura 06** - Ilustração de feixe incidindo em planos cristalinos.
- Figura 07** - Quatro tipos de equipamentos para tomografia computadorizada de transmissão gama
- Figura 08** - Definição da projeção do coeficiente de atenuação linear ao longo de um feixe de raios gama, quando este atravessa a seção AB de um objeto estudado.
- Figura 09** - Localização da área de coleta de amostras da Formação Botucatu (km 190 da rodovia Castelo Branco).
- Figura 10** - Acessórios para confecção das amostras
- Figura 11** - Fluxograma para confecção dos Corpos de Provas
- Figura 12** - Rocha Arenito do tipo Botucatu sendo reduzida a pó
- Figura 13** - Foto ilustrativo do procedimento utilizado para pesagem
- Figura 14** - Foto ilustrativo da embalagem do Cloreto de Bário
- Figura 15** - Foto ilustrativo da preparação da mistura do Cloreto de Bário com água.
- Figura 16** - Foto ilustrativo do material formado para preparação do corpo de prova úmido com Bário;
- Figura 17** - Processo de preparação da amostra da rocha úmida.
- Figura 18** - Foto ilustrativo da inserção do material na camisa.
- Figura 19** - Compressão do material com o martetele.
- Figura 20** - Retirada do corpo de prova pronto dos acessórios
- Figura 21** - Embalagem dos corpos de prova.
- Figura 22** - Calibração dos transdutores *bender elements*
- Figura 23** - Corpo de prova utilizado no ensaio com *bender elements*
- Figura 24** - Aparato experimental para ensaio com *bender elements*



**Figura 25** - Aparelho de Casagrande.

**Figura 26** - Ensaio para determinação do limite de liquidez.

**Figura 27** - Foto ilustrativa de obtenção do limite de plasticidade ( $W_p$ ).

**Figura 28** - Ilustração do ensaio de proctor (a e b). Em (c) uma foto dos componentes do ensaio.

**Figura 29** - Esquematização de ensaio de permeabilidade com carga constante.

**Figura 30** - Difratorômetro de Raio X modelo MULTIFLEX, marca RIGAKU.

**Figura 31** - Equipamento de Fluorescência do raio X, modelo EDX-900HS da marca SHIMADZU.

**Figura 32** - Microscópio da marca Leica, modelo DM-750M.

**Figura 33** - Microscopia por Varredura Eletrônica (MEV).

**Figura 34** - Tomógrafo de terceira geração

**Figura 35** - Esquema do sistema tomográfico utilizado

**Figura 36** - Vista superior do tomógrafo

**Figura 37** - Imagem do fantom multifásico composto por PMMA

**Figura 38** - Difratorograma de Raios X da amostra da rocha arenito Botucatu

**Figura 39** - Imagens da amostra com ampliação de 40 e de 100 vezes.

**Figura 40** - Imagens da rocha arenito Botucatu ampliadas 100 e 500 vezes.

**Figura 41** - Imagens da rocha arenito Botucatu ampliadas da rocha arenito Botucatu ampliadas 1000, 1200, 1500, 2000 e 2500 vezes.

**Figura 42** - Image reconstruída do fantom multifásico.

**Figura 43** - Relação entre Densidade x Coeficiente de Atenuação Linear.

**Figura 44** - Imagens reconstruídas das amostras de rochas seca (A), rocha úmida (B) e rocha úmida contendo Bário (C),

**Figura 45** - Histograma da distribuição de valores de densidade para rochas seca, úmida e úmida contendo Bário.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	4
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
<b>3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Geologia regional do Arenito Botucatu .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2. Arenito Botucatu .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3. Métodos De Caracterização Física E Química De Materiais         Cristalinos.....</b>	<b>24</b>
3.3.1. Difração De Raios X (DRX).....	24
3.3.2. Fundamento Da Fluorescência De Raios X.....	26
3.3.3. Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV).....	28
3.3.4. Tomografia Computadorizada (CT).....	29
<b>4. MATERIAIS E METODOLOGIA .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 Materiais .....</b>	<b>34</b>
<b>4.3 Amostras .....</b>	<b>35</b>
4.3.1 <i>Preparação de Amostras Seca, Úmida e Úmida com Cloreto de                 Bário 35</i>	
<b>4.4 Ensaios geotécnicos.....</b>	<b>45</b>
4.4.1 <i>Cálculo de Velocidade de cisalhamento por meio de elementos                 piezoelétricos -Ensaio com Bender Elements.....</i>	<i>46</i>
4.4.2 <i>Limites de Atterberg por Método de Casa Grande.....</i>	<i>49</i>
4.4.2.1 <i>Ensaio Proctor Normal.....</i>	<i>51</i>
4.4.3 <i>Ensaio de permeabilidade - Carga constante .....</i>	<i>52</i>
<b>4.5 Caracterização físico-química das rochas arenito .....</b>	<b>53</b>
4.5.1 <i>Análise da estrutura cristalina: difração de raios x (drx).....</i>	<i>53</i>
4.5.2 <i>Fluorescência do Raios X. ....</i>	<i>54</i>
4.5.3 <i>Microscopia Óptica (MO) e Microscopia por Varredura                 Eletrônica (MEV) .....</i>	<i>55</i>
4.5.4 <i>Tomografia Computadorizada (CT).....</i>	<i>58</i>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>62</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>73</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>75</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Os recursos naturais sempre foram os grandes impulsionadores do desenvolvimento da humanidade ao longo de toda a história, assim como a utilização das águas subterrâneas é antiga, com indícios desde a pré-história (MANZIONE, 2015).

Apesar de toda a preocupação que remonta aos filósofos gregos preocupados com o ciclo hidrológico e a interação das águas subterrâneas com as superficiais (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000) foi apenas no século XVII que se clarificou a forma de pensar sobre a interação entre as águas superficiais e subterrâneas.

A água subterrânea representa 97% da água doce disponível e no Brasil foram iniciados estudos devido à necessidade de abastecimento de grandes áreas secas (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000).

Obras de perfurações com técnicas de alto custo econômico têm sido usados para obtenção de dados destas águas subterrâneas diferentemente do que ocorre com as águas superficiais, que dispõe de métodos mais fáceis e baratos (LUCAS, 2012).

A estimativa da taxa de recarga do aquífero, que depende de variáveis de tempo e espaço, além das características físicas e físico-químicas é de grande importância para análise do sistema aquífero estudado (LUCAS, 2012).

Um ponto importante é a ocupação das áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani para agricultura, devido à fragilidade do solo e do potencial contaminante de produtos químicos da zona saturada do aquífero (GOMES et al., 2006).

O aquífero guarani constitui o maior manancial subterrâneo de água doce do mundo, e está localizado em grande parte no Brasil – região Sul e Sudeste, e também abrangendo o Paraguai, Uruguai e Argentina, ocupando uma área de aproximadamente 1 milhão de km<sup>2</sup>. A espessura desse aquífero pode chegar a 450 metros na parte central da Bacia do Paraná na qual está contida. Frequentemente há contato, em sua parte superior, com basaltos da formação Serra Geral. A origem da água existentes no Aquífero Guarani, em grande parte, oriunda da percolação de águas meteóricas durante um lapso de tempo de milhares de anos nas regiões de afloramentos.

O arenito da Formação Botucatu (Figura 01) compõe a litologia do Sistema Aquífero Guarani (SAG) (ROCHA, 2017) e trata-se de uma importante rocha reservatório, correspondente a estratos do jurássico localizado no topo do aquífero Guarani. É constituída principalmente por arenitos quartzosos de granulação fina a média, de coloração vermelha, rósea ou amarelo-clara, bem selecionados, maduros, podendo conter feldspato alterado e cimentado por sílica ou por óxido de ferro, que lhe confere a coloração rosa avermelhada (BIGARELLA, 1967). Como estrutura característica desses arenitos, ocorre estratificação cruzada tangencial de grande porte. (CAETANO-CHANG,1992).

**Figura 01** – Ocorrência da formação Botucatu. Perfil da formação na área de coleta (km 190 da Rodovia Castelo Branco – SP).



**Fonte:** Autoria própria, 2018.

Por definição, uma rocha-reservatório é uma rocha caracterizada por ter porosidade e permeabilidade adequadas para conter um fluido (Água). Assim como porosidade é a relação entre o volume de espaços vazios e o volume total de uma rocha, e permeabilidade, a medida da capacidade de circulação de um fluido através de uma rocha. (CAETANO-CHANG,1993).

A água armazenada no Aquífero Guarani, principalmente pela formação Botucatu, é

muito utilizada no abastecimento de centenas de cidades localizadas acima desse, por meio de poços de profundidade variada. A qualidade da água deste aquífero corre o risco de ser prejudicada, principalmente por atividades inadequadas de manejo agrícola, industrial e de disposição de resíduos.

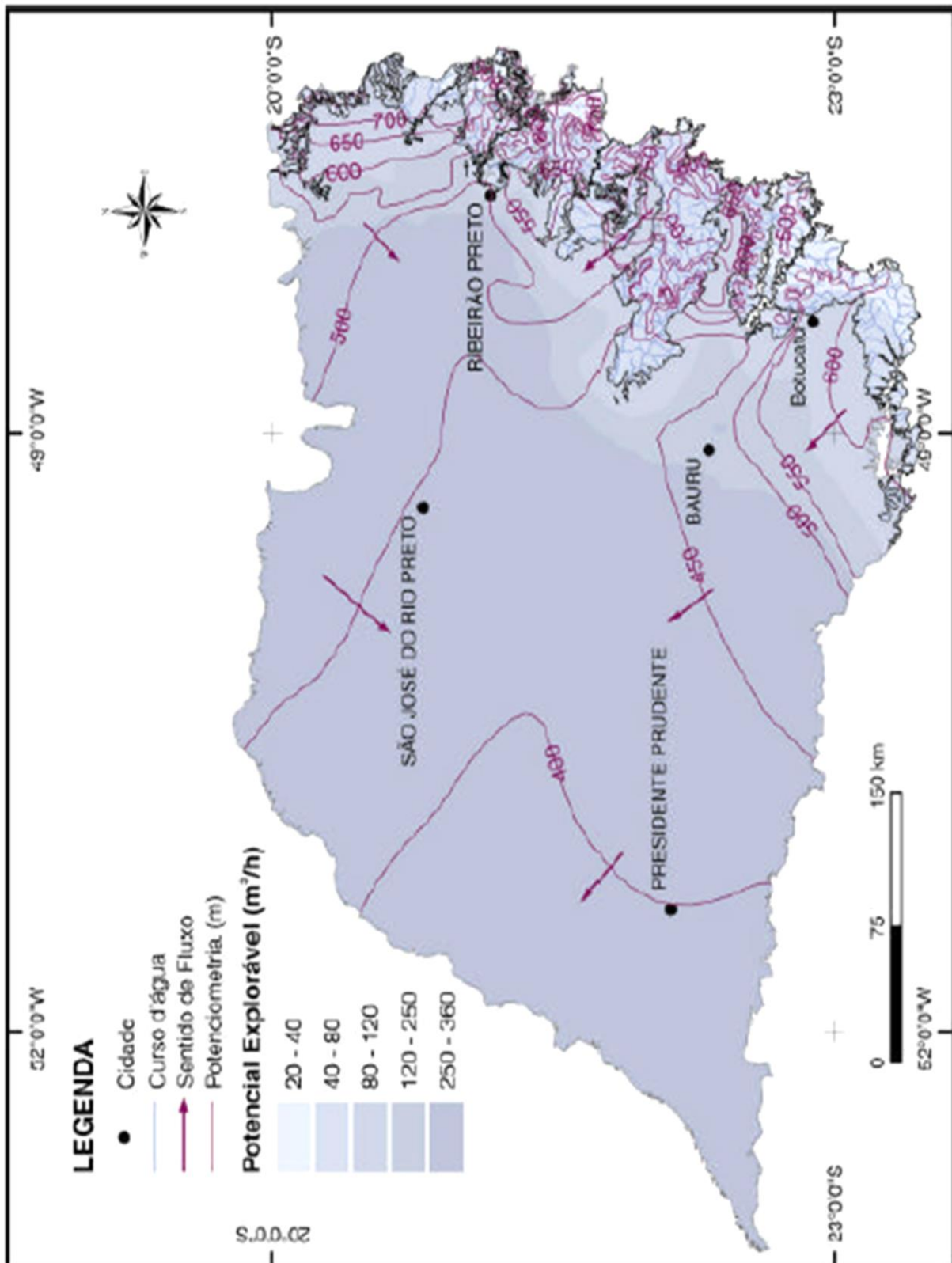
O Sistema Aquífero Guarani, por ser de origem complexa, não pode ser restringido apenas ao aspecto hidrogeológico. A qualidade do aquífero depende:

- Das condições climáticas reinantes da área de recarga;
- Da interação da água infiltrada com a rocha;
- Das características sedimentares dos arenitos (condições deposicionais, modificações diagenéticas e a compartimentação tectônica).

O interesse da sociedade pelo uso e proteção dos mananciais subterrâneos tem sido ampliado devido à poluição e escassez acelerada dos recursos hídricos superficiais. Apesar da sua extensão transfronteiriça, é no Estado de São Paulo, a região mais industrializada e populosa, que o Aquífero Guarani é mais intensamente utilizado, logo, concentra o maior número de poços tubulares. Parte desses poços é destinada ao abastecimento público (CHANG, 2006).

No Estado de São Paulo, o Sistema Aquífero Guarani (Figura 02) é delimitado na base e no topo por dois aquitardes, respectivamente, as rochas vulcânicas cretácicas da Formação Serra Geral e das rochas pelíticas permianas do Grupo Passa Dois (Formações Corumbataí, Teresina, Rio do Rastro). Apesar de constituir regionalmente um aquífero fraturado, a Formação Serra Geral impõe condições de confinamento profundo ao conjunto sedimentar arenoso pré-vulcânico, determina o artesianismo do SAG em boa parte do oeste paulista.

Figura 02: Mapa de potencialidade Aquífero Guarani com indicação das vazões exploráveis.



Fonte: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (2006).

Devido à sua complexa heterogeneidade estrutural e composicional, a capacidade produtiva do Sistema Aquífero Guarani está sujeita a variações ao longo de sua extensão (MACHADO, 2005). Diversos parâmetros podem influenciar a qualidade desse reservatório, tais como sua constituição mineralógica e textural, bem como os processos físico-químicos atuantes durante sua diagênese não são os mesmos em todo o aquífero, influenciando a produtividade de água em poços em diferentes localidades. Tais parâmetros são úteis nos estudos de geociências na elaboração de modelos diagenéticos para a predição da qualidade de reservatórios. Encontram-se na literatura diversos estudos realizados para caracterização física, físico-químicas e estruturais de rochas que compõem o Sistema Aquífero Guarani, como a de Formação de Botucatu (CAETANO-CHANG & WU, 1992; CAETANO-CHANG & WU, 1993; CAETANO-CHANG & WU, 2003; GESICKI, 2007; ROCHA, 2017; SOARES, 1972).

Avanços tecnológicos na área de instrumentação e do controle computadorizado têm estimulado o desenvolvimento de técnicas não invasivas para a medida e a visualização das características destas rochas (CHEN, J.; KEMOUN A., 1999).

A tomografia computadorizada (CT) é uma técnica de diagnóstico, não invasiva, que permite a obtenção de imagens bidimensionais ou tridimensionais de materiais a serem estudados. A tomografia computadorizada foi desenvolvida inicialmente como uma técnica de diagnóstico médico, baseando-se na atenuação da radiação nuclear e dos raios X, com o intuito de fornecer informações sobre os detalhes internos do corpo humano.

Esta técnica gera imagens que não são influenciadas pela estrutura externa da seção estudada, melhorando a resolução, revelando detalhes da distribuição da estrutura interna de um objeto com alta precisão e exatidão. Os instrumentos de medida para aplicação industrial e médica utilizam sensores/detectores de radiação robustos, não invasivos. Para a reconstrução da imagem tomográfica de uma seção transversal estudada (observada pelos detectores) utiliza-se um sistema computacional. Neste contexto, a tomografia computadorizada oferece vários métodos sensíveis e convenientes para a verificação de novos modelos de processos na indústria, em substituição aos modelos de reatores simplificados obtidos com técnicas de traçadores convencionais. Tais técnicas convencionais



utilizam métodos de amostragem invasivos, que modificam os processos (coloca-se suspensão sólida/líquida para aumentar alguma propriedade). Além disso, as informações registradas estão restringidas a uma pequena zona do processo dentro do recipiente, ou requerem uma grande quantidade de medições. Por outro lado, as técnicas tomográficas têm uma resolução excelente e podem ser usadas para gerar imagens de 2 e 3 dimensões (CARVALHO, D. V. S. ; MARCATO, L. A. ; HAMADA, M. M. ; MARTINS, J. F. T. ; SANTOS, R. A. dos ; COSTA, F. E. da ; MESQUITA, C. H.,2010).

Devido a complexidade e heterogeneidade nas estruturas e composições da rocha em estudo, de acordo com a sua localização, este trabalho visa ampliar o conhecimento sobre a rocha reservatório de Formação Botucatu, utilizando diferentes técnicas para sua caracterização, tais como Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (MORALES, 2007; LIU, 2019), Fluorescência e Difração de Raio X (PETERSON, 2018; SCAPIN, 2003) e Tomografia Computadorizada (ROY, 1997).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos Gerais**

Aperfeiçoar o conhecimento das características do solo arenítico de Formação Botucatu por meio de suas propriedades físicas e físico-químicas, com intuito de contribuir no procedimento de análise quanto ao armazenamento, na forma de reservatório, de fluidos.

### **2.2. Objetivos Específicos**

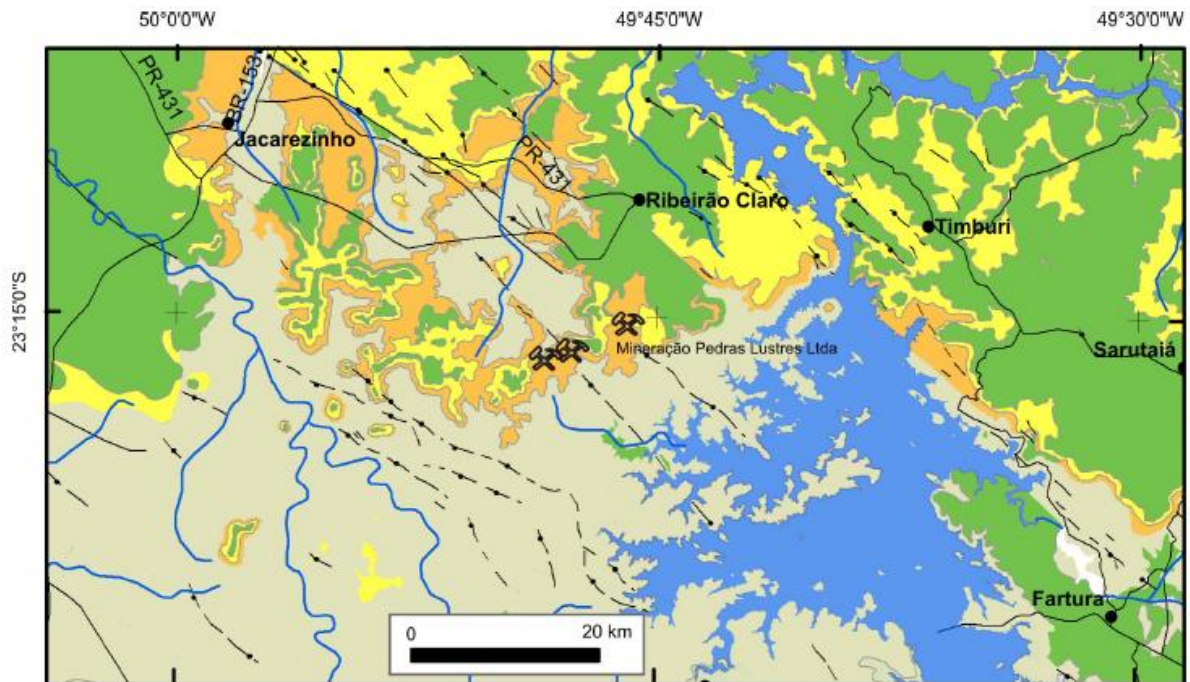
Determinar parâmetros que possam ser associados através de estudos geotécnicos e por imagem para direcionar futuros estudos associados à exploração do arenito como reservatório de água.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 3.1. Geologia regional do Arenito Botucatu

Na região sudeste do Estado de São Paulo e nordeste do Estado do Paraná foram mapeadas rochas arenosas, siltosas e argilosas das formações Botucatu, Pirambóia, Rio do Rastro, Teresina e rochas vulcânicas na forma de diques, soleiras, derrames basálticos da Formação Serra Geral (Figura 03).

**Figura 03:** Mapa geológico simplificado da distribuição dos arenitos da Formação Botucatu e das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, na porção SW do Estado de São Paulo e norte do Paraná.



#### LEGENDA

	Depósitos aluvionares		Diques básicos
	Fm Serra Geral - derrames de basaltos		Falhas
	Fm Serra Geral - soleiras de diabásio		Pedreira de Arenito
	Fm Serra Geral - derrames de traquidacitos		Cidades
	Formação Botucatu		BR-153 Rodovias
	Formação Pirambóia		Rios e ribeirões
	Grupo Passa Dois		Represa de Chavantes

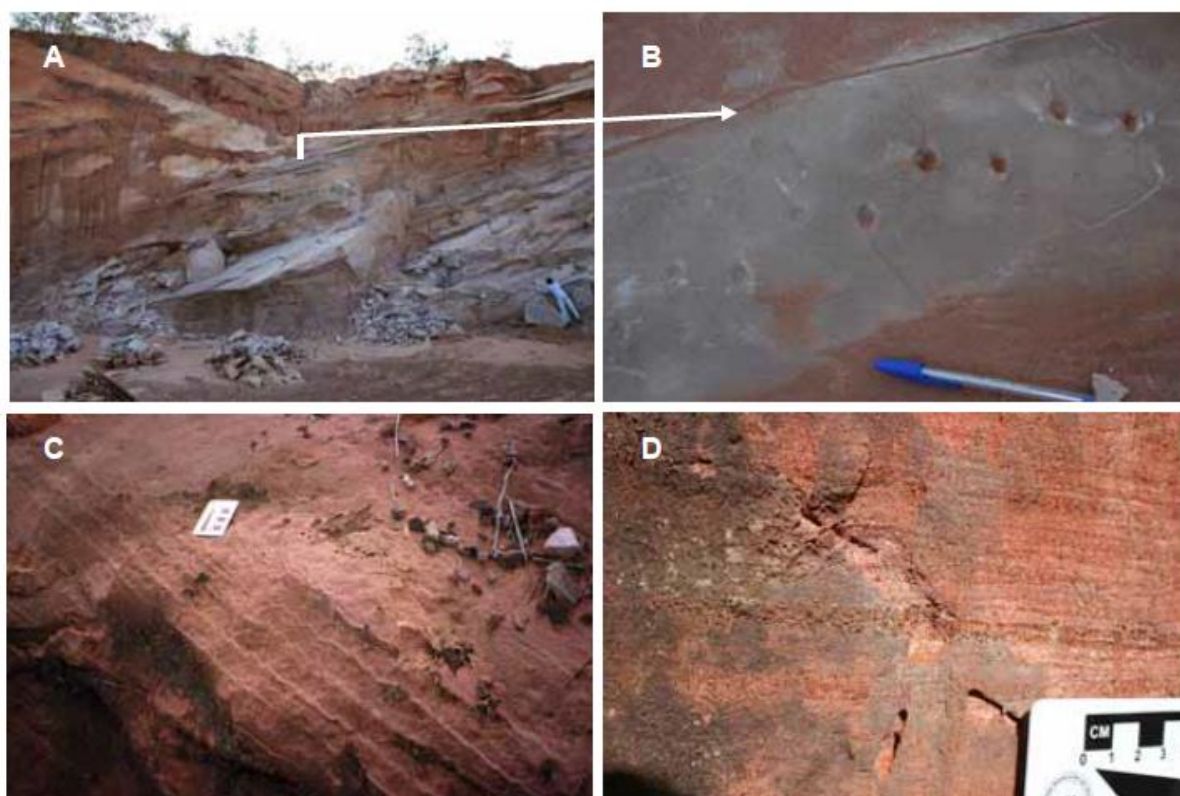


Fonte: Montanheiro *et. al.* 2011.



A Formação Botucatu (Figura 05) caracteriza-se, principalmente, dos arenitos avermelhados, por vezes róseos e esbranquiçados, com grãos bem selecionados e bem arredondados, em geral foscos e com alta esferecidade (IPT, 2000), sendo denominados, localmente, quartzo-arenitos (WU, 1981). Os arenitos são muito friáveis ou silicificados e o teor de lama é, em geral, inferior a 10 %.

**Figura 05:** Arenitos finos do sistema eólico seco Botucatu. Estratificações cruzadas (A) de médio a grande porte. Pegadas de fósseis (B). Feições deformacionais (C) devido à processos de escorregamentos nas frentes de duna. Observa-se a bimodalidade granulométrica (D).



Fonte: Gesicki *et. al.*, 2007.

### 3.2. Arenito Botucatu

A caracterização litológico-estrutural, nomenclatura e interpretação paleoambiental dos arenitos mesozoicos infrabasálticos sofreram variações no decorrer do tempo, em razão do avanço do seu conhecimento e, principalmente, por sua grande importância hidrogeológica. Essa sequência arenosa constitui o internacionalmente conhecido Sistema Aquífero Guarani (SAG), que ocorre, além do Brasil, no Paraguai, Uruguai e Argentina, compreendendo uma área estimada em 1.200.000 km<sup>2</sup>. No Brasil, abrange cerca de 839.800 km<sup>2</sup>, 155.800 km<sup>2</sup> dos quais no

Estado de São Paulo, com área de afloramento neste Estado de 23.370 km<sup>2</sup> (SMA, 2.004).

Desde a menção, pela primeira vez, do termo Botucatu, o pacote arenoso mesozoico infrabasáltico no Estado de São Paulo foi considerado ora indiviso, ora desmembrável do ponto de vista litoestratigráfico. A partir da década de 70 foi subdividido em duas unidades, de gêneses diferentes. Para essa interpretação foram consideradas, principalmente, as estruturas sedimentares presentes e as características texturais e morfométricas dos arenitos analisados, faltando, porém, a utilização da análise de fácies sedimentares para o entendimento dos processos responsáveis pela deposição dos sedimentos e, conseqüentemente, para uma interpretação adequada da evolução paleoambiental ocorrida na Bacia do Paraná nessa época. A aplicação do estudo faciológico nesses arenitos só viria a ocorrer no início da década de 90, quando a Formação Pirambóia, tida até então como sendo essencialmente de origem fluvial, passou a ser considerada como predominantemente eólica, a exemplo do que ocorre com a unidade imediatamente sobreposta, a Formação Botucatu (SOARES, 1972).

Deve-se a GONZAGA DE CAMPOS (1889) a primeira menção aos sedimentitos Botucatu na serra homônima: “arenitos moles” vermelhos, que recobriam as camadas paleozoicas e em geral alternavam na sua parte superior com “augito-porfiritos” (basaltos). Para WASHBURNE (1930), essa sequência arenosa representava-se, então, por dois elementos: uma parte inferior, fluvial (Piramboia) e outra superior (Botucatu sensu strictu), de origem eólica. O Botucatu compreendia “arenito vermelho ou quase vermelho, de granulação grossa, e com forte estratificação falsa que acompanha as linhas curvas características de depósitos eólicos”. ALMEIDA & BARBOSA (1953) admitiram que os arenitos pré-basálticos representavam um único ciclo sedimentar, refletindo condições climáticas que evoluíram de quente e úmida para desérticas. No entanto, distinguiram um membro inferior, o Arenito Piramboia, de caráter essencialmente aquoso, e outro superior, o Arenito Botucatu, de origem eólica. Na descrição da Geologia do Estado de São Paulo, ALMEIDA (1964) reconheceu três fácies na Formação Botucatu: 1) “fácies fluvial e de planícies de inundação”, compreendendo arenitos argilosos de cor rosada, granulação grossa a fina, com estratificação plano-paralela ou cruzada, podendo conter pequenos seixos rolados de quartzo ou calcedonito; associam-se,

subsidiariamente, camadas de siltitos e folhelhos micáceos, podendo ocorrer, ainda que raramente, conglomerado de granulação fina; 2) “fácies lacustre” (Fácies Santana) que mostra sequência de delgadas camadas, de poucos metros de espessura, compreendendo arenitos argilosos algo micáceos, de granulação fina a média, além de siltitos e folhelhos mais ou menos micáceos de cor vermelha (esverdeada em Rifaina), dispondo-se em lâminas e finas camadas com perfeita estratificação plano-paralela, onde se encontraram restos de conchostráceos e ostracódeos; 3) “fácies eólica dunar”, representando a maior parte do Arenito Botucatu em São Paulo, composta por arenitos de cor vermelha pálida, reduzida consistência e generalizada estratificação cruzada eólica; as frações arenosas, que geralmente equivalem a mais de 90% do peso da rocha, costumam ter mais que essa proporção de grãos de quartzo, em geral bem arredondados; os arenitos são bem selecionados, de granulação média a fina, só excepcionalmente possuindo frações maiores que 1 mm, e normalmente não tendo mais do que 10% de silte e argila. Para esse autor, o contato basal da Formação Botucatu, com a Formação Corumbataí, ocorreria através de um regolito fóssil, como observado nas encostas da serra da Fartura, com a presença de uma brecha composta por fragmentos angulosos de sílex, folhelhos e arenitos da Formação Corumbataí dispersos em matriz areno-argilosa vermelha. O Arenito Botucatu, segundo ALMEIDA (1954), seria do Jurássico, em razão de o vulcanismo basáltico do Grupo São Bento ter sido considerado desse período geológico por datações geocronológicas então realizadas.

Em mapeamento realizado para a PETROBRAS nas regiões centro e nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo, VIEIRA (1973) reconheceu dentro da Formação Botucatu, embora não subdividida nos mapas apresentados, duas unidades mapeáveis distintas: uma inferior, fluvial (Piramboia), e outra superior, eólica, que seria a Formação Botucatu propriamente dita. A “Fácies” Botucatu (eólica) estaria representada por “arenitos róseos, granulação média, bem selecionados, grãos foscos, bem laminados nas grandes cunhas de sua notável estratificação cruzada e conglomerático na base”, na parte sul da área. O conjunto todo teria uma espessura variável em torno de 100 m, em alguns locais reduzindo-se para 50 m e em outros atingindo 150 m. O contato da “Fácies” Piramboia com o Paleozoico seria concordante gradacional no sul e discordante ao norte da área mapeada; já o

contato Piramboia/Botucatu foi interpretado como sendo discordante, o mesmo ocorrendo entre o Botucatu e o Serra Geral. Tanto a “Fácies” Piramboia quanto a Formação Botucatu propriamente dita foram consideradas, por esse autor, de idade triássica. SOARES (1973) realizou uma análise estratigráfica regional dos arenitos Botucatu e Piramboia, que constituem a sequência final da sedimentação gondwânica, tendo executado o levantamento das seções e dos afloramentos mais representativos da sequência, além da análise das estruturas sedimentares dos arenitos, da textura e da mineralogia de uma centena de amostras coletadas, e do exame de perfis de poços perfurados pela PETROBRAS no Estado de São Paulo. O trabalho de detalhe realizado na região nordeste do Estado de São Paulo por SOARES *et al.* (1973) introduziu definitivamente nos mapas geológicos os termos Piramboia e Botucatu como formações geológicas distintas e mapeáveis. A Formação Botucatu é considerada uma unidade genética de ambiente desértico, compreendendo arenitos de granulação fina a média, subsidiariamente frações de grãos muito finos e grossos, teor em lama (silte + argila) inferior a 10% (geralmente inferior a 5%), os grãos tendo bom arredondamento e boa esfericidade nas frações areias média e fina. A estratificação cruzada planar é predominantemente de grande porte e tangencial na base; localmente ocorreriam, na sua porção basal, arenitos conglomeráticos.

No estudo de águas subterrâneas realizado na Região Administrativa 6, de Ribeirão Preto, o DAEE (1974) apresentou coluna estratigráfica baseada no trabalho de SOARES (1973), considerando os arenitos pré-basálticos subdivididos em duas unidades distintas: a inferior, denominada Formação Pirambóia, de origem aquosa, e a superior, Formação Botucatu, de origem eólica. A Formação Botucatu, cuja descrição foi baseada em SOARES *et al.* (1973), afloraria nessa região em uma área de aproximadamente 5.000 km<sup>2</sup>, apresentando em Ribeirão Preto uma espessura de 90 a 100 m. Segundo esse estudo, a Formação Botucatu situa-se na fração areia fina, próximo ao limite com areia média, as curvas granulométricas evidenciarium um selecionamento muito bom nos arenitos Botucatu.

Com o mesmo enfoque abordado por SOARES (1972, 1973 e 1975) quanto às características texturais e estruturais dos arenitos mesozóicos pré-vulcânicos, foi apresentado por CAVALCANTE *et al.* (1979) mapeamento geológico na escala 1:250.000 das quadrículas de Ribeirão Preto e Campinas, dentre outras, onde as



formações Botucatu e Piramboia aparecem cartografadas separadamente. Também as interpretações paleoambientais foram as mesmas apresentadas pelos autores antecedentes, com a Formação Piramboia sendo considerada de origem continental fluvial, com depósitos de rios meandantes e anastomosados, com pequenas lagoas associadas, e a Formação Botucatu representando a deposição em ambiente desértico, eólico, ocorrendo, localmente, em sua parte basal, depósitos de origem torrencial e, mais raramente, depósitos lacustres no topo. À unidade Piramboia foi atribuída idade triássico-jurássica e à Botucatu, idade jurássico-cretácea. O mapa geológico do Estado de São Paulo apresentado pelo IPT (1981) também não apresentou novidades quanto à cartografia das formações Botucatu e Piramboia, expostas distintamente no mapa em questão, bem como com relação às suas características litológicas, estruturas sedimentares, idades, aspectos texturais e paleoambientes deposicionais, mantendo, assim, as mesmas definições até então vigentes.

### **3.3. Métodos De Caracterização Física E Química De Materiais Cristalinos**

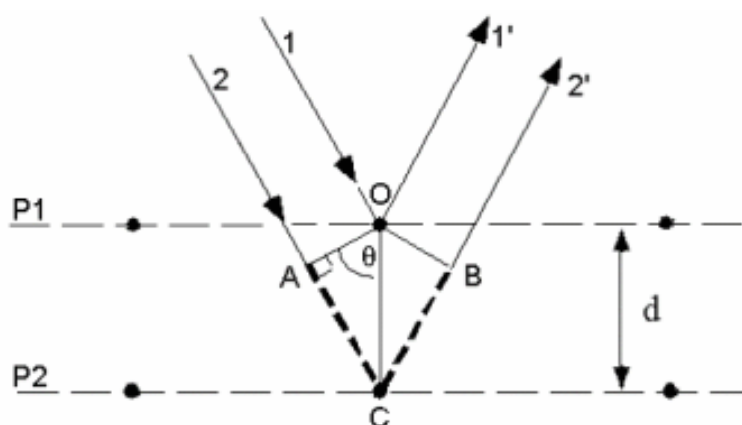
#### **3.3.1. Difração De Raios X (DRX)**

Uma técnica para se obter as dimensões e a composição da célula cristalina, isto é, fazer uma análise microestrutural, é incidir radiação de comprimentos de onda adequados sobre o cristal. Este é o princípio fundamental da técnica de difração de raios X. Os primeiros estudos dessa técnica foram feitos em 1912, pelo físico alemão Max Von Laue. Ele considerou que, se os cristais eram compostos de átomos regularmente espaçados que podem atuar como centros de dispersão para raios X, e se os raios X são ondas eletromagnéticas de comprimento de onda igual à distância interatômica nos cristais, então seria possível difratar raios X por meio de cristais [SANTOS, 2016 CULLITY, 1956].

Quando o comprimento de onda da radiação incidente é da mesma ordem de grandeza que a distância interatômica da rede cristalina, o feixe é difratado em

relação de fase (interação construtiva – formação de picos de difração) pelos átomos do cristal. Com este feixe difratado, pode-se calcular as posições dos átomos no cristal, planos cristalinos, por meio da Lei de Bragg [SANTOS, 2016 CULLITY, 1956], como mostrado na Figura 6 e na Equação 1:

**Figura 6:** Ilustração de feixe incidindo em planos cristalinos.



Fonte: SANTOS, 2016

onde:  $\theta$  o ângulo da radiação incidente no plano de átomos em análise,  $d$  a distância entre os planos cristalinos, ABC a trajetória extra que a radiação difratada pelo átomo B tem de percorrer, tem-se:

$$AB = d \sin\theta$$

como  $AC = BC$ , (1)

$$n\lambda = 2AB,$$

ou seja:

$$n\lambda = 2 d \sin\theta$$

Considerando-se uma estrutura cúbica simples e sendo  $a$  = distância interatômica (parâmetro de rede);  $h, k, l$  = planos para cálculo do índice de Miller, que fornecem a orientação do plano cristalino [SANTOS, 2016 CULLITY, 1956], tem-se a relação:

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2)$$

Dessa forma, variando-se o ângulo de incidência, pode-se obter informações relacionadas a diversas famílias de planos cristalinos, bem como suas orientações em relação ao feixe de radiação incidente. Esta técnica permite, assim, estudar os planos cristalinos, as distâncias interplanares e densidades nos planos específicos e comparação entre padrões difratométricos [SANTOS, 2016 CULLITY, 1956].

Quando os átomos de um determinado material sofrem empilhamentos dando origem a planos bem definidos no espaço, apresentando uma mesma orientação (índices de Miller), tem-se a formação de monocristais. Uma vez que a obtenção de monocristais é tecnologicamente complexa, o emprego da técnica de DRX faz necessária a pulverização do cristal a ser analisado. Isso possibilita que os planos de difração do material, com orientação específica, sejam distribuídos em todas as direções, aumentando a probabilidade de ocorrer a difração [SANTOS, 2016 CULLITY, 1956].

### 3.3.2. Fundamento Da Fluorescência De Raios X

A análise por fluorescência de raios X é um método quali-quantitativo baseado na medida das intensidades (número de raios X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra (VIRGILIO, 1999). Os raios X emitidos por tubos de raios X, ou raios X ou gama por uma fonte radioativa, excitam os elementos que constituem, os quais, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra.

Quando um elemento de uma amostra é ionizado, este tende a ejetar os elétrons do interior dos níveis dos átomos, e como consequência disto, elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada transição

eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron, e esta energia é emitida na forma de um fóton de raio X, de energia característica e bem definida para cada elemento. Assim, de modo resumido, a análise por fluorescência de raios X consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios

Para provocar a emissão dos raios X característicos dos elementos que constituem a amostra, a excitação pode ser feita de várias maneiras: excitação por partículas aceleradas como elétrons, prótons ou íons; excitação por raios X, partículas alfa, partículas beta negativas ou raios gama emitidos por radionuclídeos, além do processo mais utilizado até recentemente, que é através raios X gerados em tubos. Nos processos onde se utilizam elétrons, prótons ou íons, e também máquinas geradoras de raios X, há necessidade de se ter instrumentação eletro-eletrônica capaz de produzir altas diferenças de potencial elétrico (alta tensão), extremamente estáveis e, portanto, são sofisticadas e caras. Quando se emprega fontes radioativas, emissoras de partículas alfa, beta negativas, raios X ou gama de baixa energia, não há necessidade desse equipamento eletro-eletrônico e são baratas e extremamente compactas, mas tem as desvantagens de requererem blindagem radiológica devido à exposição contínua e de terem intensidades relativamente inferiores às máquinas geradoras de raios X. Das fontes excitadoras, as máquinas de raios X tem sido as mais utilizadas, mas em análises de amostras com teores não muito baixos tem-se empregado fontes radioativas, e dependendo do radionuclídeo utilizado, pode-se enfocar uma faixa ou outra de elementos de interesse (VIRGILIO, 1999).

Dentre os radionuclídeos utilizados como fontes radioativas, os mais interessantes do ponto de vista experimental tem sido aqueles que se desintegram por captura eletrônica, como o  $^{55}\text{Fe}$  (com meia-vida física de 2,7 anos; emissor de raios X Mn-K $\alpha$ , de 5,9 keV) e  $^{109}\text{Cd}$  (1,27 anos; raios X Ag-K $\alpha$ , 22,2 keV), ou por emissão de partícula alfa, como o  $^{238}\text{Pu}$  (86,4 anos; raios X U-L, de 13,6 e 17,2 keV) e  $^{241}\text{Am}$  (428 anos; emissor de raios X Np-L de 13,9 e 17,7 keV, ainda raios gama de 59,5 keV). Para haver produção de raios X característicos há necessidade de se retirar elétrons localizados nas camadas mais internas dos átomos, por exemplo camada K, e para isto a energia mínima deve ser superior a energia de ligação do elétron nessa camada, denominada energia de ligação eletrônica ou também de corte de

absorção. Esta energia de ligação eletrônica pode ser calculada de modo aproximado, aplicando-se a teoria atômica de Bohr para o átomo de hidrogênio e átomos hidrogenóides, e posteriormente, fazendo-se algumas considerações sobre as experiências de Moseley. Desse modo, a equação 3 permite o cálculo aproximado dessa energia para os elétrons das camadas K e L dos átomos de um elemento (VIRGILIO, 1999).

$$E = \frac{me^4(2-b)^2}{8\epsilon_0 \cdot 2h^2 \cdot n^2} \quad (3)$$

onde: E = energia de ligação eletrônica (joules), m = massa de repouso do elétron =  $9,11 \cdot 10^{-31}$  kilogramas, e = carga elétrica do elétron =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  coulombs, Z = número atômico do elemento emissor dos raios X, b = constante de Moseley, com valores iguais a 1 e 7,4, para as camadas K e L, respectivamente.  $\epsilon_0$  = permitividade elétrica no vácuo =  $8,8534 \cdot 10^{-12}$  coulombs.newton<sup>-1</sup>.metro<sup>-2</sup>, h = constante de Planck =  $6,625 \cdot 10^{-34}$  joules.s, e n = no quântico principal do nível eletrônico (n = 1 para camada K, n = 2 para camada L, etc.).

### 3.3.3. Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

A técnica de microscopia eletrônica de varredura permite a obtenção de informações topográficas, morfológicas, químicas e estruturais de amostras de diversos materiais, possibilitando correlacionar sua microestrutura com propriedades químicas, mecânicas e processos de fabricação relacionados. Possui alta resolução (0,2 a 5 nm), grande profundidade de foco, imagem com aparência tridimensional e relativa facilidade de preparação das amostras. Essa técnica possibilita que um feixe de elétrons de alta energia incida na superfície de determinada amostra com a probabilidade de ocorrer os seguintes fenômenos: (a) parte do feixe é refletida e coletada por um sistema detector que converte este sinal em uma imagem de elétrons retroespalhados (BSE); (b) parte do feixe incide no material provocando a emissão de elétrons, produzindo a chamada imagem de elétrons secundários (ES) e (c) ocorre a emissão de raios X que permite conhecer a composição química de um ponto ou região específica da superfície da amostra e identificar os elementos

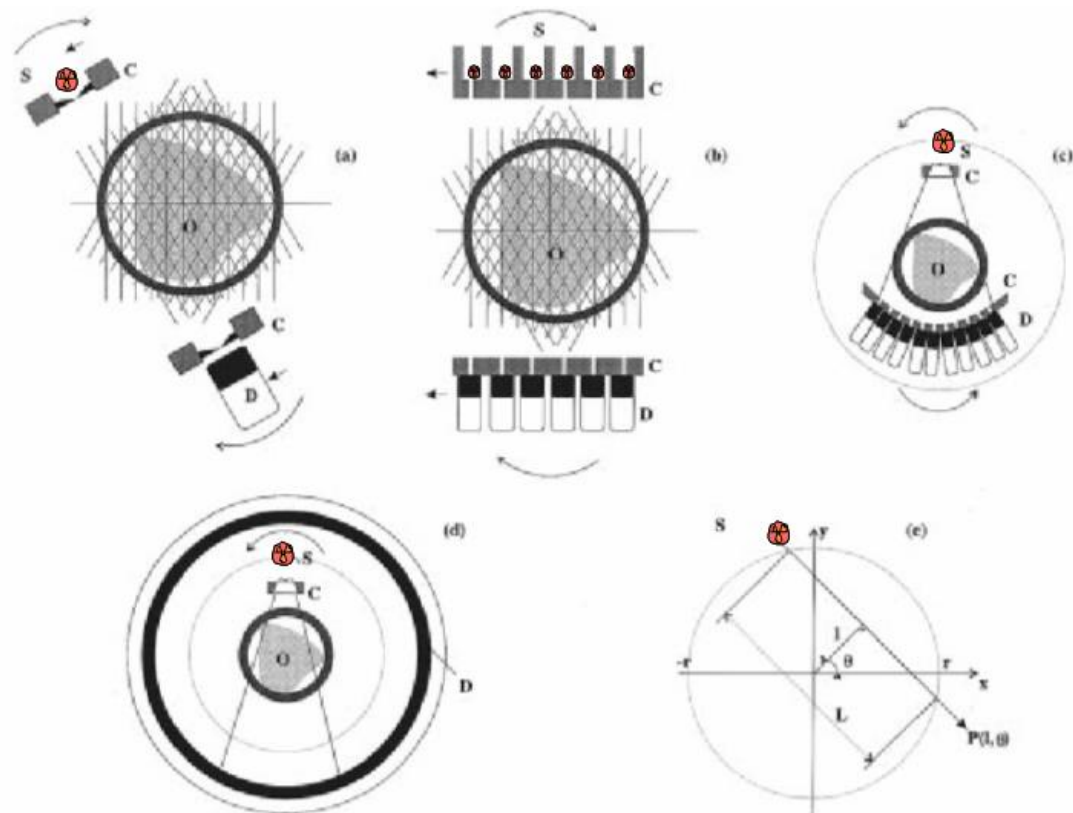
químicos presentes na mesma, sendo essa a técnica denominada de espectrometria de energia dispersiva de Raios X (EDS) [SANTOS, 2016].

#### 3.3.4. Tomografia Computadorizada (CT)

O princípio da tomografia computadorizada (CT) por transmissão consiste na transmissão dos raios gama podendo ser também raios X, através de um meio heterogêneo acompanhada pela atenuação da radiação incidente. A medição desta atenuação fornece a medida da integral na linha da distribuição da densidade de massa através do caminho percorrido pelo feixe. A medição de vários feixes com diferentes orientações, tanto angulares como espaciais em relação ao volume estudado, seguida de um processo de reconstrução de imagem, fornece a distribuição de densidade das fases com um alto grau de resolução. Se a coleta de dados for automática e o procedimento para a reconstrução de imagem for realizado por um computador, este processo pode ser chamado tomografia computadorizada (CT). Os sistemas tomográficos baseados na transmissão utilizam conjuntos de fontes radioativas encapsuladas e detectores, colocados nos lados opostos do objeto a ser estudado. (SALVADOR, 2008)

Os sistemas tomográficos da primeira geração consistem de uma fonte que emite um feixe pontual de radiação e um detector (figura 7). Estes se movimentam pelos lados opostos do objeto de estudo, medindo a atenuação da radiação em cada posição. Este método tomográfico depende do tempo e não é capaz de coletar vários dados para movimentos rápidos do sistema sem introduzir erros importantes na reconstrução da imagem.

**Figura 7** – Quatro tipos de equipamentos para tomografia computadorizada de transmissão gama: (a) translação–rotação de um feixe em paralelo (primeira geração); (b) translação – rotação de múltiplas fontes em paralelo (segunda geração); (c) rotação de um feixe em leque (terceira geração); (d) detector fixo – rotação da fonte (quarta geração); (e) sistema de coordenadas para a reconstrução de imagem na tomografia computadorizada por transmissão e definição do raio soma. D: detectores; S: fonte; C: colimador; O: objeto estudado.



**Fonte:** CHAOUKI et al., 1997.

Nos sistemas tomográficos da segunda geração, conjuntos de detectores são colocados na frente de uma fonte radioativa simples que se movimentam ao redor do objeto estudado fornecendo um número de projeções igual ao número de detectores. Algumas vezes, estes sistemas de segunda geração utilizam também fontes radioativas múltiplas para reduzir o tempo de análise do sistema. Empregando-se este método, o tempo de aquisição de dados pode levar menos de 1 min. (SALVADOR, 2008)

A fonte utilizada em sistemas tomográficos de terceira geração é colimada de forma que o caminho percorrido pelos feixes seja semelhante a um leque. O sistema

movimenta-se ao redor do objeto estudado obtendo-se uma vista particular para uma posição “X” do conjunto fonte – detectores. Neste tipo de sistema podem ser utilizados várias fontes e vários arranjos de detectores.

Os sistemas denominados de quarta geração utilizam um arranjo composto de um detector fixo (grande número de detectores montados em um anel fixo) e uma fonte radioativa que se movimenta ao redor do objeto. No seu interior, o feixe em forma de leque é detectado em  $10^{-3}$  segundos. Os registros de qualquer medida são provenientes do detector, representando uma vista do objeto. No entanto, todos os CT são constituídos principalmente das mesmas partes, ou seja, um sistema de aquisição de dados do objeto estudado e um computador adequado (SALVADOR, 2008).

Dois fatores são fundamentais para as medidas de atenuação, a saber: a escolha do tipo e geometria do material radioativo e o sistema de detecção.

A escolha do material radioativo apropriado para cada tipo de estudo deve ser baseada nas condições de experiência e no tipo de informação que se deseja obter (BRAZ & LOPES, 2000; BROOKS & DICHIRO, 1976) As principais variáveis que devem ser consideradas são: a) elemento; b) meia-vida; c) tipo de energia e d) atividade.

O tipo de radiação mais adequado para usos industriais é a radiação gama, pois, por ser uma radiação eletromagnética tem a vantagem de maior penetrabilidade. Como consequência, muitas medições podem ser realizadas sem nenhuma alteração das instalações e de forma contínua. A sensibilidade de detecção está relacionada com o radioisótopo e o detector utilizados. Atualmente, para aplicações em tomografia computadorizada, os detectores de radiação mais utilizados são os cintiladores. Os detectores mais adequados são aqueles que atendem o compromisso de maior eficiência de contagem e menor “tempo morto”.

A radiação gama interage com a matéria por meio de quatro efeitos, retro-espalhamento, efeito fotoelétrico, efeito Compton, e produção de pares. Todas estas interações dependem da energia do fóton incidente e do número atômico do material



absorvedor. A passagem pela matéria de um feixe fino e bem colimado de fótons de raios gama é regida pela lei de Beer-Lambert como demonstrado na Equação 4 (KAK & SLANEY, 2001)

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu(E)L} \quad (4)$$

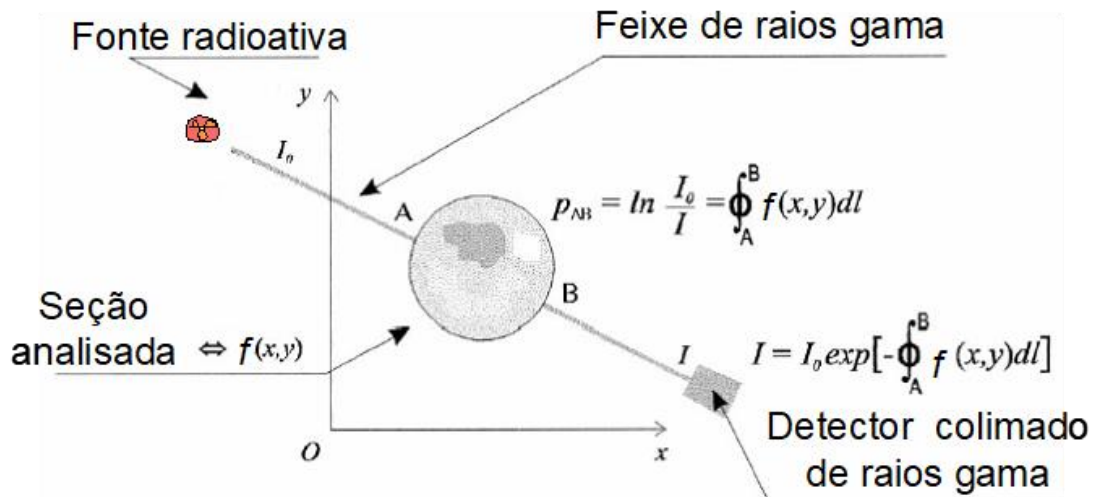
Onde  $I_0$  é a intensidade do raio gama incidente,  $I$  é a intensidade do raio detectado após o objeto,  $\mu(E)$  é o coeficiente linear de atenuação da amostra, e  $L$  é a espessura da amostra.

Cada medida do feixe atenuado de radiação para uma determinada orientação angular e espacial constitui a projeção do objeto, sendo esta digitalizada e arquivada em um computador. O método de reconstrução é aplicado para qualquer objeto bidimensional que possuir uma propriedade desconhecida que dependa do espaço,  $f(x,y)$  (função da imagem ou distribuição dos coeficientes de atenuação). As informações sobre esta propriedade podem ser obtidas pelas medições das projeções destas funções nas linhas que atravessam o objeto estudado. Se  $P(l,\theta)$  representar um grupo de projeções (conhecidas também como a raio soma) de  $f(x,y)$  ao longo de um feixe de ângulo, e  $l$  representar a distância desde a origem ( $-r, r$ ,  $r$  = dimensão da seção estudada), a relação entre estes será dada pela Equação 5. (KAK & SLANEY, 2001)

$$P(l, \theta) = \int_L f(x, l) ds \quad (5)$$

Da Equação 4, pode-se determinar a projeção do coeficiente de atenuação linear em uma determinada direção em um sistema de coordenadas cartesianas (valor de  $\mu_x$  para uma determinada separação e direção da fonte e o detector) como é mostrada na figura 8. Quando um grande número de feixes de radiação atravessa um objeto em um mesmo plano, pode ser medido um número igual de projeções, simultaneamente. Se todos os feixes forem coplanares, as suas projeções determinarão uma seção através do objeto.

**Figura 8** – Definição da projeção do coeficiente de atenuação linear ao longo de um feixe de raios gama, quando este atravessa a seção AB de um objeto estudado.



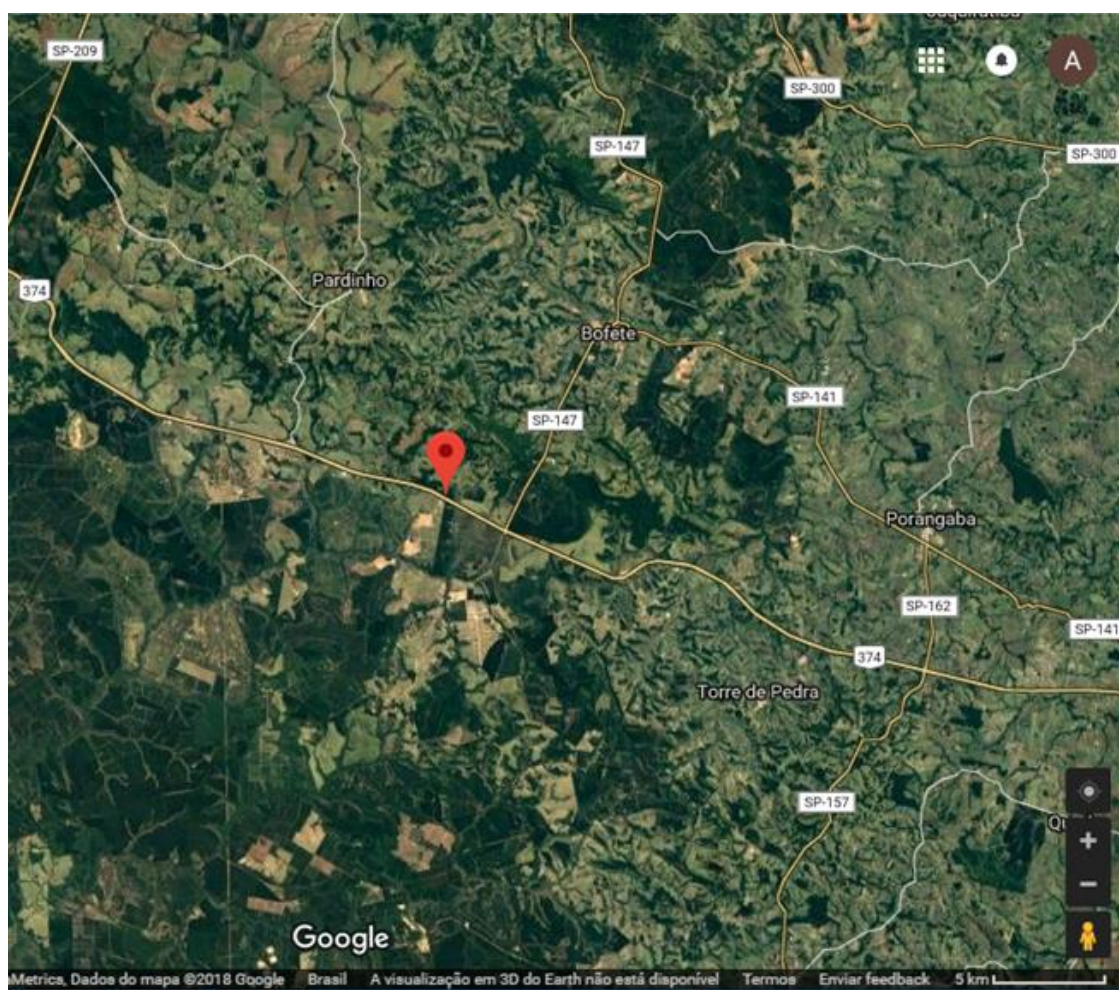
Fonte: CHAOUKI et al., 1997.

## 4. MATERIAIS E METODOLOGIA

### 4.1 Materiais

Amostras das rochas arenitos de Formação Botucatu foram coletadas da área localizada à 180 km da capital de São Paulo (Figura 09), sentido oeste, no quilometro 190 da Rodovia Castelo Branco, a 11 km da cidade Bofete (Lat 23,168778°, lon -48,333111°). A coleta das amostras foi realizada em meados de janeiro de 2018 seguindo a norma NBR 16434/2015, que descreve procedimentos recomendados para a coleta, manuseio e preparação de amostras de resíduos sólidos, solos e sedimentos.

**Figura 09** – Localização da área de coleta de amostras da Formação Botucatu (km 190 da rodovia Castelo Branco).



Fonte: Autoria própria, 2018.

## 4.2 Amostras

As amostras coletadas, para estudo em laboratório, pertencem ao afloramento localizado no km 190 da rodovia Castelo Branco, município de Bofete - estado de São Paulo, sentido capital. A área forneceu, além da facilidade de obtenção, boas amostras para o trabalho. A coleta das amostras foi realizada no em meados de janeiro de 2018. O material foi devidamente acondicionado, pesado, fotografado, para posteriores análises. De acordo com a NBR 16434/2015, que descreve procedimentos recomendados para a coleta, manuseio e preparação de amostras de resíduos sólidos, solos e sedimentos.

### 4.2.1 Preparação de Amostras Seca, Úmida e Úmida com Cloreto de Bário

Para poder mensurar a variação das propriedades geotécnicas do solo contaminado, foi realizado a compactação de três amostras do solo arenoso, conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016).

Os ensaios de compactação foram executados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Cidade de São Paulo – UNICID.

As amostras foram compactadas na energia normal com prévia secagem e os dados iniciais das amostras são mostrados na tabela 01 a seguir:

**Tabela 01:** Dados iniciais do ensaio de compactação das amostras

Amostra	Massa do Solo Úmido (g)	Massa Específica dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )
01 – Não Contaminado	4053	2,6
02 – Não Contaminado	4313	2,6
03 – Contaminado	4556	2,6

**Fonte:** Autoria Própria (2019).

A densidade relativa dos grãos (Gs) foi arbitrada em 2,60g/cm<sup>3</sup>

Para a preparação das amostras foram utilizados os seguintes acessórios (Figura 10): a) camisa principal, b) suporte da camisa, c) tampa inferior, d) tampa superior, e) camisa superior, f) extrator hidráulico, g) disco de travamento, h) martetele e i) régua.

**Figura 10** – Acessórios para confecção das amostras



**Fonte:** Autoria própria, 2019.

O fluxograma apresentado na Figura 11 sumariza os onze processos utilizados para a confecção dos três corpos de prova da rocha arenítica.

Os Corpos de Prova Seco e úmido foram umedecidas com água destilada. No terceiro Corpo de Prova úmido foi utilizado o composto químico Cloreto de Bário ( $BaCl_2$ ) adquirido da empresa Auro's Química Indústria e Comércio Ltda, que fora diluído em água destilada, conforme indicação da embalagem. As propriedades do composto químico utilizado ( $BaCl_2$ ), são mostradas na tabela 02:

**Tabela 02:** Propriedades do Cloreto de Bário (BaCl<sub>2</sub>).

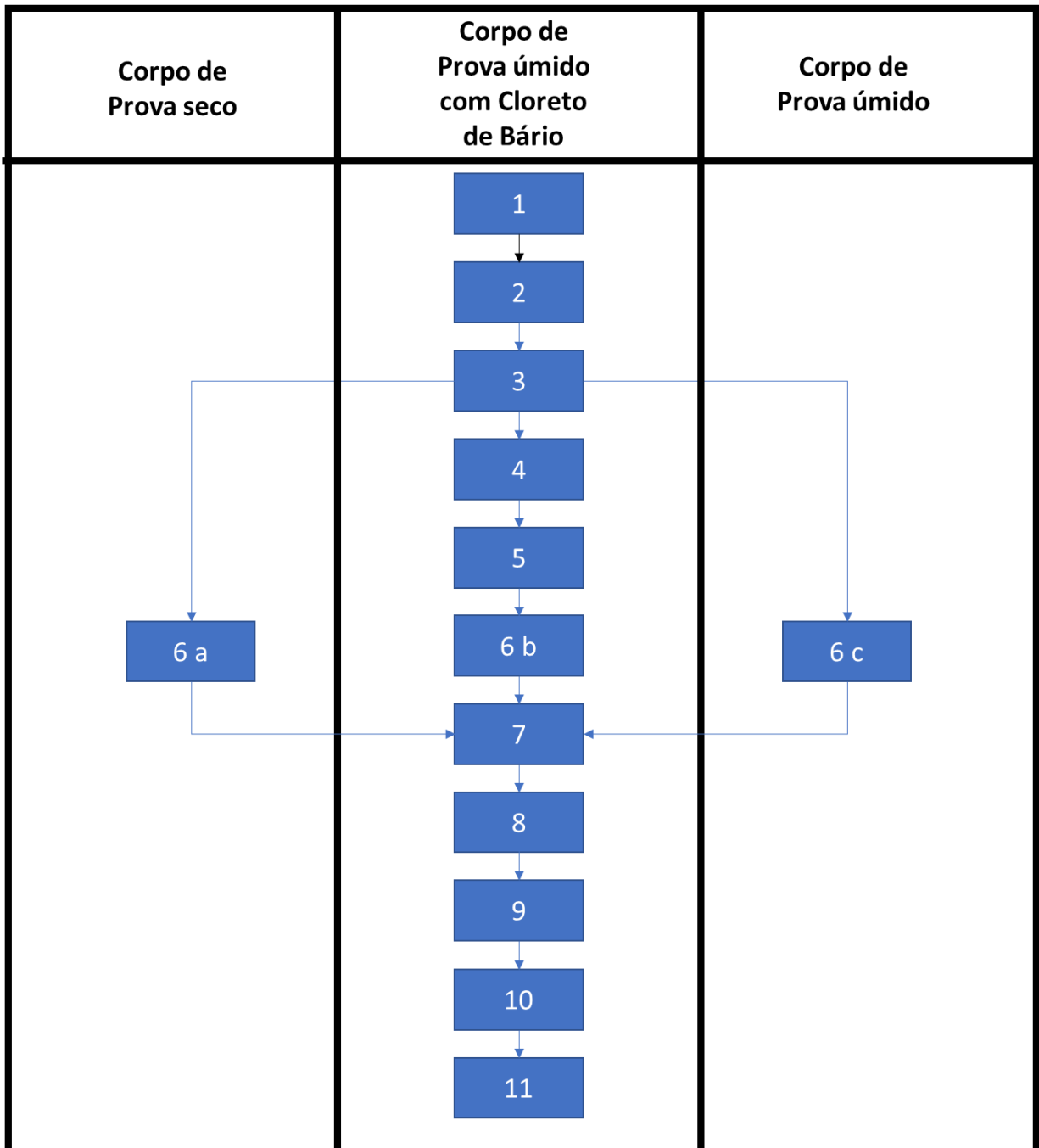
Massa molar	208,23 g/mol
Fórmula	BaCl <sub>2</sub>
Densidade	3,86 g/cm <sup>3</sup>
Ponto de ebulição	1.560 °C
Ponto de fusão	962 °C
Quantidade	1 Kg

**Fonte:** Auro's Química, 2019

Como o Cloreto de Bário reage com água, produzindo um gás tóxico à altas concentrações, com riscos à saúde humana, para a realização do ensaio, sobretudo na etapa de diluição do produto, foram utilizados os EPI's necessários, como jaleco, máscara e luvas, possibilitando não ter contato direto com o composto químico.

Após a diluição, foi realizado a mistura do Cloreto de Bário com o solo previamente destorroado, seguindo com a homogeneização do material e a posterior compactação na energia especificada.

Figura 11 – Fluxograma para confecção dos Corpos de Provas



Fonte: Autoria própria, 2019.

A seguir é descrita sucintamente cada uma das etapas da confecção das amostras da rocha.

Processo 1: Colocação do material recolhido (Rocha de arenito do tipo Botucatu) no município de Bofete em uma bandeja;

Processo 2: Pulverização da rocha, reduzindo a pó conforme Figura 12;

**Figura 12** – Rocha Arenito do tipo Botucatu sendo reduzida a pó



**Fonte:** Autoria própria, 2019.

Processo 3: Pesagem do material, conforme ilustrado na Figura 13.

**Figura 13** – Foto ilustrativo do procedimento utilizado para pesagem



**Fonte:** Autoria própria, 2019.



Os três primeiros processos descritos são utilizados para preparação das amostras de rochas seca; úmida e úmida com Cloreto de Bário. Os processos 4 e 5 são utilizados somente para a preparação da terceira amostra, ou seja, para a rocha úmida com Cloreto de Bário.

Processo 4: Abertura da embalagem de Cloreto de Bário mostrada na Figura 14.

**Figura 14** – Foto ilustrativo da embalagem do Cloreto de Bário



Fonte: Autoria própria, 2019.

Processo 5: Elaboração da Mistura do Cloreto de Bário com água, na Figura 15

**Figura 15** – Foto ilustrativo da preparação da mistura do Cloreto de Bário com água.



Fonte: Autoria própria, 2019.

No processo 6, os procedimentos utilizados são específicos para preparação de cada uma das três amostras das rochas: seca (6a), úmida 6(c) e úmida com cloreto de cálcio (6b).

Processo 6 a: Junção das partículas da rocha Arenito tipo Botucatu utilizando pouca Água, apenas para dar liga entre as partículas para a confecção da rocha seca;

Processo 6 b: Junção das partículas da rocha Arenito com cloreto de bário, utilizando a mistura de Água com o Cloreto de Bário preparado no Processo 5, de modo a obter a rocha úmida (Figura 16);

**Figura 16:** Foto ilustrativo do material formado para preparação do corpo de prova úmido com Bário.



**Fonte:** Autoria própria, 2019.

Processo 6 c: Junção das partículas da rocha com um volume grande de Água para obter amostra de rocha úmida (Figura 17)

**Figura 17:** Processo de preparação da amostra da rocha úmida.



**Fonte:** Autoria própria, 2019.

A partir do processo 7 até o 11, os mesmos procedimentos foram utilizados para preparação das três amostras das rochas; seca, úmida e úmida com cloreto de cálcio.

Processo 7: Inserção do material preparado na camisa para elaboração do corpo de prova.

**Figura 18:** Foto ilustrativo da inserção do material na camisa.



**Fonte:** Autoria própria, 2019.

Processo 8: Compressão do material com o martetele até formar uma massa compacta (Figura 19)

Para a amostra ser compactada na energia normal utilizando o cilindro grande, a quantidade de golpes por camada com o soquete utilizado foi de 12 golpes proferidos em cinco camadas igualmente distribuídas no cilindro. Foram utilizados o cilindro e o soquete grandes, juntamente com o disco espaçador, conforme a norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Os ensaios foram realizados sem reuso de material e preparados com secagem prévia até a umidade higroscópica.

**Figura 19:** Compressão do material com o martetele.



**Fonte:** Autoria própria, 2019.

Processo 9: Retirada do corpo de prova pronto dos acessórios (Figura 20)

**Figura 20:** Retirada do corpo de prova pronto dos acessórios.



**Fonte:** Autoria própria, 2019.

Processo 10: Embalar os corpos de prova com filme de PVC (Figura 21). As amostras obtidas dos ensaios foram embaladas em plástico filme e acondicionadas em caixa de isopor para possibilitar o transporte das mesmas para o ensaio em tomógrafo, permitindo a contenção dos parâmetros do solo, principalmente a umidade, para correlações futuras.

**Figura 21:** Embalagem dos corpos de prova .



**Fonte:** Autoria própria, 2019.

Processo 11: Envio dos Corpos de Prova para a realização das medidas tomográficas.

Para a medição do teor de umidade, foram retiradas três amostras diretamente da bandeja de preparo do solo, de cada amostra de compactação, para a determinação da umidade.

O resultado do ensaio de compactação das três amostras é mostrado na tabela 03 abaixo:

**Tabela 03:** Resultado do ensaio de compactação das amostras

Amostra	Teor de umidade	Massa específica Aparente Seco	Grau de Saturação
	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
01 - Não Contaminado	4,82	1,85	31,2
02 - Não Contaminado	7,25	1,93	54,2
03 - Contaminado	10,86	1,97	88,5

**Fonte:** Autoria própria, 2019.

### 4.3 Ensaio geotécnicos

Para os ensaios geotécnicos foi utilizado a infraestrutura dos laboratórios de materiais e solos, mecânica e eletrônica da Universidade Cidade de São Paulo – UNICID. Nesses laboratórios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Permeômetro de carga constante;
- Aparelho de Casagrande;
- Estufa;
- Proctor Normal;
- Transdutores (sensores) piezelétricos;
- Microscópio óptico;
- *Bender Elements*;
- Gerador funções;

- Osciloscópio digital.

A análise contempla fotografias da área estudada, mapa de localização, coleta de amostras da formação Botucatu, testes laboratoriais geotécnicos.

O trabalho teve início com uma extensa pesquisa bibliográfica sobre o estudo da Formação Botucatu, suas propriedades físicas e químicas conhecidas e o processo evolutivo.

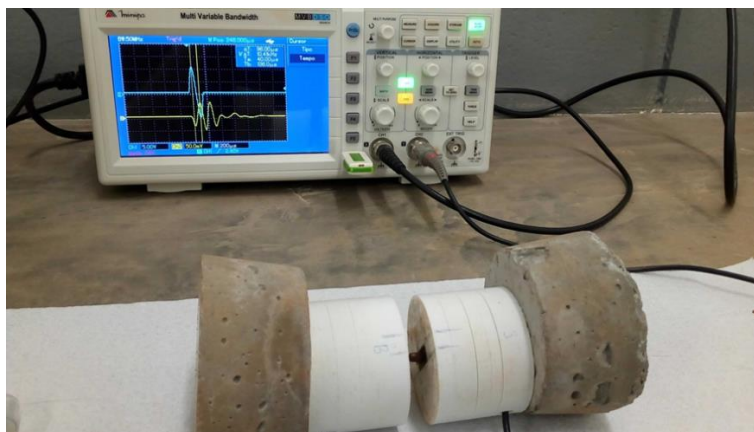
#### 4.3.1 *Cálculo de Velocidade de cisalhamento por meio de elementos piezoelétricos -Ensaio com Bender Elements*

A capacidade de converter energia elétrica em energia mecânica ou vice-versa, a chamada piezoelectricidade, permite que os transdutores piezoelétricos funcionem como atuadores ou sensores, sendo que na maior parte dos casos o mesmo transdutor pode realizar ambas as funções (FERREIRA, 2003).

Os *bender elements* são pequenas placas retangulares piezo-cerâmicas que sofrem flexão quando excitadas por pulsos elétricos ou, geram pulsos elétricos quando fletidas. Um comprimento de 3 a 9 mm dessas placas fica em balanço, para que sejam inseridas dentro do solo para ser realizado o ensaio. Os *bender elements* trabalham em pares, sendo um elemento transmissor e outro receptor, e são posicionados em faces opostas do corpo de prova (SQUEGLIA, 2009).

Para o ensaio com o *bender elements*, inicialmente é necessário à realização de calibração dos transdutores. Para isso é realizado a aferição do *time delay* regularmente, que consiste em medir o tempo de propagação da onda por meio do contato entre os dois transdutores utilizados para a transmissão e a recepção. É recomendado que o *time delay* e a medição da velocidade da onda no solo sejam realizados em diversas frequências, sendo o dado a ser considerado no cálculo é a média entre os valores obtidos. A Figura 22 ilustra o esquema da calibração dos transdutores *bender elements*, utilizando um osciloscópio digital modelo Minipa MVB-DSO, enquanto a Figura 23 apresenta o corpo de prova utilizado no ensaio.

**Figura 22:** Calibração dos transdutores *bender elements*



**Fonte:** Autoria própria, 2018.

Os dados do time delay aferidos nos ensaios constam na Tabela 04:

**Tabela 04:** Frequência x Time delay.

Frequências	<i>Time delay</i> ( $\mu\text{s}$ )
5 kHz	96-100
7 kHz	84-88
10 kHz	72-76
12 kHz	66-72
15 kHz	62-64
20 kHz	60-64

**Fonte:** Autoria própria, 2018.

**Figura 23:** Corpo de prova utilizado no ensaio com *bender elements*

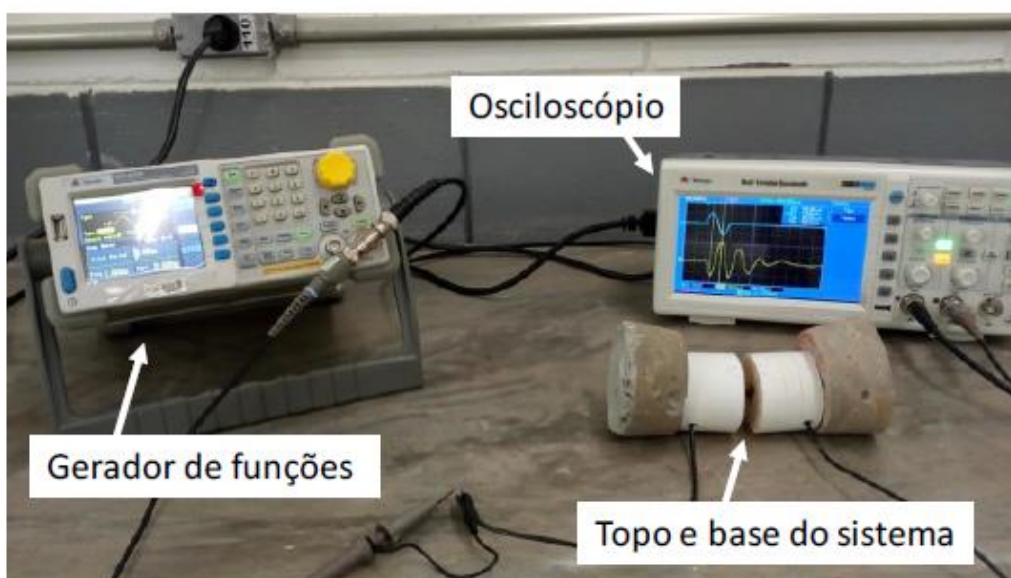


**Fonte:** Autoria própria, 2018



Na etapa de ensaios com os *bender elements* foi utilizado um gerador de ondas de modelo Minipa MFG-4205, empregado para a estimulação do movimento no transdutor piezoelétrico. Na recepção e observação da onda propagada no corpo de prova e captada pelo elemento receptor, foi usado um osciloscópio digital modelo Minipa MVB-DSO, cujos dados são utilizados para o cálculo do tempo de propagação da onda. O aparato experimental para os ensaios com o *bender elements* é mostrado na Figura 24.

**Figura 24.** Aparato experimental para ensaio com *bender elements*



. **Fonte:** Autoria própria, 2018.

O cálculo da velocidade da onda de cisalhamento que atravessa o corpo de prova, dado pela equação (6), considera que o comprimento percorrido por ela corresponda à distância entre as extremidades do elemento transmissor e receptor ( $L_t$ ) (VIGGIANI e ATKINSON, 1995; DYVIK e MADSHUS, 1985), e ainda que o tempo percorrido neste percurso ( $t$ ) seja dado pelo intervalo entre a emissão e recepção da onda.

Assim, a relação entre estas duas grandezas fornece a velocidade de propagação da onda de cisalhamento no interior do solo.

$$V_s = \frac{L_t}{t} \quad (6)$$

Onde:

(Lt) é distância entre as extremidades do elemento transmissor e receptor e t é o tempo percorrido neste percurso.

Vs é velocidade da onda de cisalhamento que atravessa o solo.

Para a realização do cálculo da velocidade da onda de cisalhamento, duas considerações foram atendidas: (1) a distância a ser utilizada nos cálculos foi tomada como a distância entre as extremidades dos *bender elements*, conforme recomendação do VIGGIANI e ATKINSON (1995) e (2) o tempo para a propagação da onda (*t*), devido a maior facilidade na aferição dos dados, foi considerado como o método pico a pico, ou seja, foi aferido o primeiro pico da onda senoidal transmitida até o primeiro pico após a deflexão do sinal recebido, como geralmente se observa nas ondas de cisalhamento.

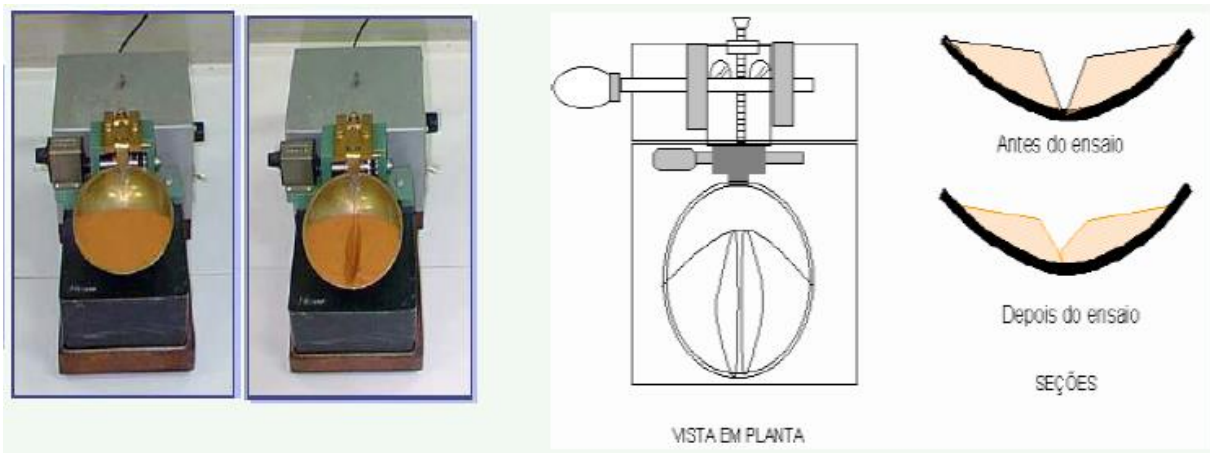
Os testes com *bender elements* foram realizados sob diversas variações de frequência. Assim, tanto os ensaios quanto a calibração foram executados com a geração de uma onda senoidal única com amplitude de 20V pico-a-pico, juntamente com seis frequências diferentes, sendo as mesmas da etapa de calibração.

#### 4.3.2 Limites de Atterberg por Método de Casa Grande

Os Limites de Atterberg são métodos de avaliação da natureza de solos criados por Albert Atterberg. Por meio de uma série de testes e ensaios foram definidos os Limites de Liquidez -  $W_L$  (estado que solo apresenta teor de água que acima deste valor o solo comporta-se como um fluido) e de Plasticidade -  $W_p$  (estado em que o solo apresenta teor de água que abaixo deste valor comporta-se como sólido) em solo (PINTO, 2006). A norma brasileira NBR-6459/84 regulamenta este ensaio. Com estes dois limites determinamos o Índice de Plasticidade ( $IP = W_L - W_p$ ).

O ensaio de liquidez foi realizado através do método de Casagrande, no qual se utilizou o aparelho de mesmo nome, ilustrado na Figura 25, com o qual foram aplicados golpes deixando a concha do aparelho cair de uma altura padrão para que ela se feche ao final dos golpes. (DAS, 2014) (PINTO, 2006).

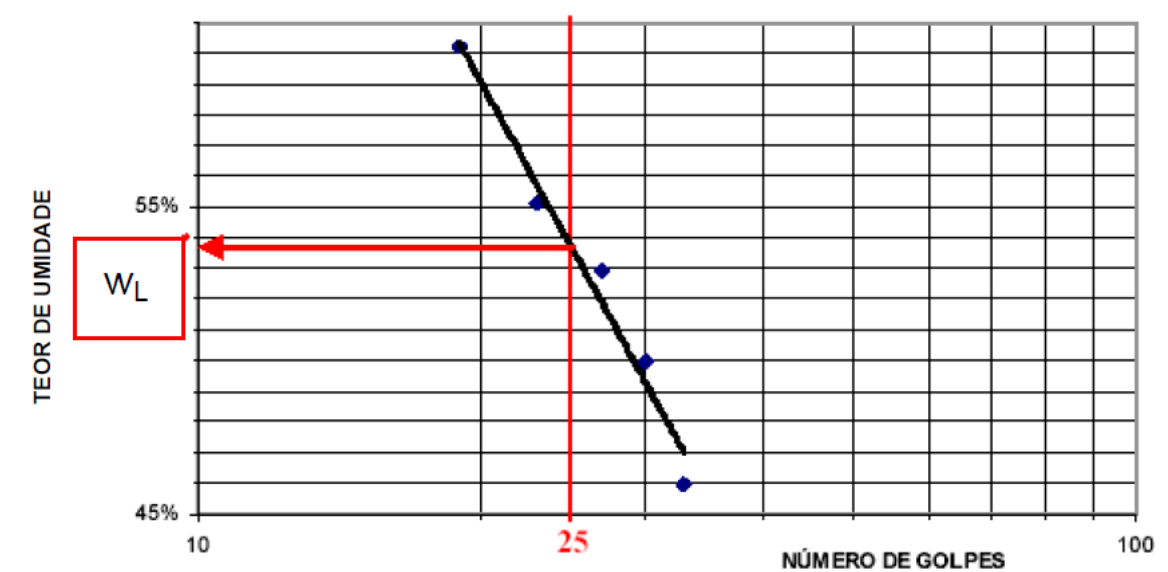
**Figura 25.** Aparelho de Casagrande.



**Fonte:** Autoria própria, 2018.

O ensaio é repetido pelo menos cinco vezes alterando-se a umidade. O valor WL é determinado através da projeção do número de golpes padrão (25) na reta interpolada, através dos pontos determinados no gráfico (figura 26).

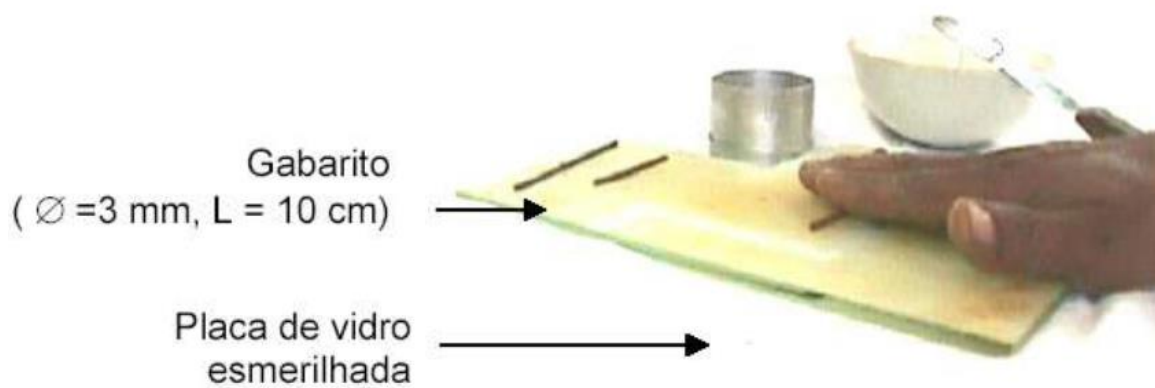
**Figura 26** – Ensaio para determinação do limite de liquidez.



**Fonte:** Autoria própria, 2018.

O limite de plasticidade ( $W_p$ ) é obtido com o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando-se com a palma mão em uma placa de vidro esmerilhada (Figura 27). Quando este cilindro quebrar, ele é pesado e secado em estufa, sendo em seguida, pesado novamente para obtenção da umidade.

**Figura 27** – Foto ilustrativa de obtenção do limite de plasticidade ( $W_p$ ).



Fonte: Autoria própria, 2018.

Estes ensaios auxiliam a definir os limites de consistência do solo. O termo consistência é usado para determinar um estado físico, ou seja, permite conhecer o grau de ligação entre as partículas das substâncias. Quando utilizado em solos finos ou coesivos, a consistência está relacionada à quantidade de água existente no solo, isto é, ao teor de umidade (PINTO, 2006).

#### 4.3.2.1 Ensaio Proctor Normal

Para o ensaio de Proctor normal, o solo foi compactado em um molde com volume de  $944 \text{ cm}^3$ . O diâmetro do molde é  $101,6 \text{ mm}$  (Figura 28 a,b e c). Durante a realização do ensaio laboratorial, o molde foi fixado a uma placa de suporte na parte inferior e estendido para a parte superior, como apresentado no esquema de Figura 28. O solo foi misturado com diferentes quantidades de água, total de cinco ensaios. Em cada ensaio foi compactado em três camadas iguais, com o teor de umidade de solo compactado determinado em laboratório, por um soquete que golpeia 25 vezes cada camada. O marteleto tem  $2,5 \text{ kg}$  de massa e altura de queda de  $30,5 \text{ cm}$ . Para cada ensaio, o peso específico úmido de compactação foi calculado conforme a equação 7.

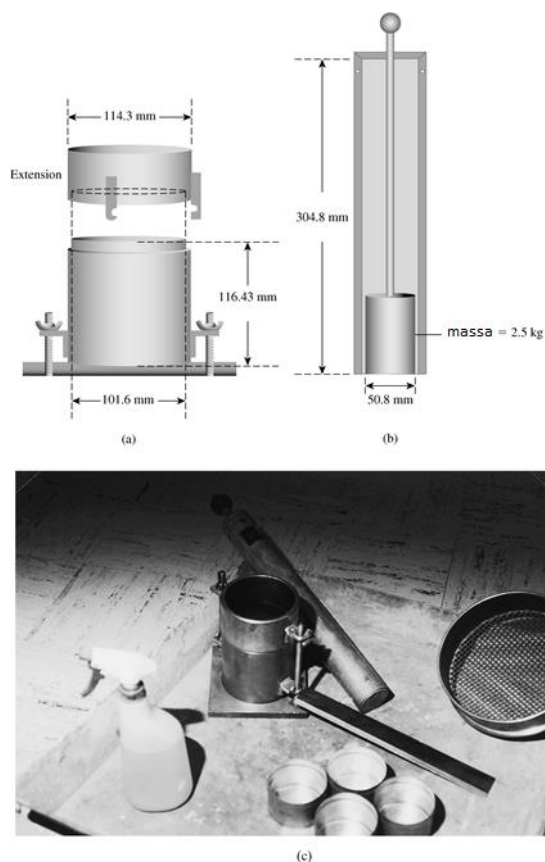
De acordo com DAS (2014)

$$\gamma = \frac{W}{V_m} \quad (7)$$

Onde:

$W$ =peso do solo compactado no molde e  $V_m$ =volume do molde [ $944 \text{ cm}^3$ ].

**Figura 28** – ilustração do ensaio de proctor (a e b). Em (c) uma foto dos componentes do ensaio.

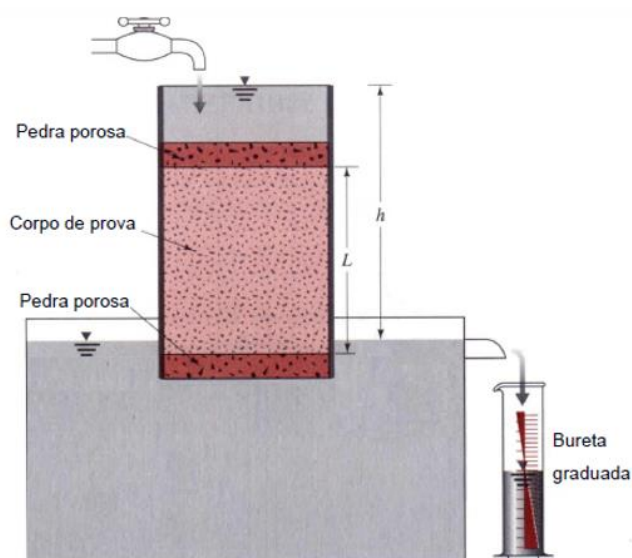


Fonte: DAS, 2014.

#### 4.3.3 Ensaio de permeabilidade - Carga constante

A medida de permeabilidade de carga constante foi realizada com um arranjo típico de ensaio de permeabilidade com carga constante (DAS, 2014), cujo esquema é mostrado na Figura 29. O abastecimento de água na entrada foi ajustado de modo que a diferença de cargas entre entrada e saída permaneça constante, ou seja, não sofra variação durante o período do ensaio. Após uma vazão constante ser estabelecida, a água foi coletada em uma bureta graduada (500 ml) até que atinja a graduação máxima, avaliando-se o tempo de preenchimento deste volume através de um cronômetro. O experimento está conforme ilustrado na Figura 29.

**Figura 29.** Esquemática de ensaio de permeabilidade com carga constante.



Fonte: DAS, 2014.

O volume total de água coletada é expresso pela equação 8:

$$V = A \left( K * \frac{h}{L} \right) t, \quad (8)$$

onde:  $A$  = área da seção transversal;  
 $k$  = constante de permeabilidade;  
 $h$  e  $L$  são as dimensões da amostra;  
 $t$  = tempo em segundos.

Desta forma a constante de permeabilidade ( $k$ ) pode ser expressa pela equação 9:

$$K = \frac{V * L}{A * h * t} \quad (9)$$

#### **4.4 Caracterização físico-química das rochas arenito**

##### *4.4.1 Análise da estrutura cristalina: difração de raios x (drx)*

A avaliação da qualidade cristalina das amostras de das rochas arenito de Formação Botucatu foi realizada utilizando o Difratômetro de Raio X modelo MULTIFLEX, marca RIGAKU (Figura 30) pertencente a CCN do IPEN/CNEN-SP..

Neste processo são identificadas as direções nas quais os planos do cristal são preferencialmente orientados (índices de Miller). Padrões de difração de Raios X foram obtidos no difratômetro a partir de radiações  $\text{CuK}\alpha$  ( $2\theta$  variando de  $20^\circ$  a  $60^\circ$ ). As amostras foram pulverizadas, de modo a possibilitar que os planos de difração do material, com orientação específica, sejam distribuídos em todas as direções, aumentando a probabilidade de ocorrer a difração.

**Figura 30.** Difratômetro de Raio X modelo MULTIFLEX, marca RIGAKU.



**Fonte:** <https://www.rigaku.com/sites/default/files/miniflex.jpg>, 2019.

#### 4.4.2 Fluorescência do Raios X.

A análise da composição química, qualitativa e quantitativa, da amostra do arenito coletada foi realizada utilizando a técnica de fluorescência de raios X e o equipamento de Fluorescência do raio X, modelo EDX-900HS da marca SHIMADZU (Figura 31) pertencente a CCN do IPEN/CNEN-SP. A espectrometria de fluorescência de raios X é uma técnica que permite identificar os elementos presentes em uma amostra, assim como estabelecer a concentração em que cada elemento se encontra presente na amostra. Na espectrometria de fluorescência de raios X uma fonte de radiação de elevada energia (radiação gama ou radiação X)

provoca a ionização dos átomos da substância que pretendemos analisar. Quando um átomo no estado fundamental fica sob a ação de uma fonte externa de energia, ele absorve esta energia, promovendo elétrons a níveis mais energéticos. Neste estado o átomo estará numa situação instável, chamada “Estado Excitado”. Na natureza tudo tende a buscar o estado de estabilidade, desta forma o átomo excitado tende naturalmente a retornar ao seu estado fundamental, ocorrendo uma emissão de energia. Esta energia envolvida na absorção é uma característica específica de cada elemento químico, permitindo a sua identificação e correspondente quantificação. (BECKHOFF, 2006).

**Figura 31.** Equipamento de Fluorescência do raio X, modelo EDX-900HS da marca SHIMADZU.



**Fonte:** [https://cdn.caeonline.com/images/shimadzu\\_edx-900hs\\_305570-prev.jpg](https://cdn.caeonline.com/images/shimadzu_edx-900hs_305570-prev.jpg), 2019.

#### 4.4.3 *Microscopia Óptica (MO) e Microscopia por Varredura Eletrônica (MEV)*

As análises de microscopias foram realizadas para investigação da morfologia das rochas arenitas.

A microscopia óptica, utilizando o microscópio da marca Leica, modelo DM-750M (Figura 32) pertencente ao Laboratório de Metalografia do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Cidade de São Paulo - UNICID, foi empregada para uma



avaliação prévia da morfologia do arenito pulverizada. Esta técnica permite a análise de grandes áreas, além de ser de simples operação, rápida e pouco dispendiosa. Essa avaliação foi realizada no microscópio óptico, com lentes de aumento de 5 a 100 vezes, filtros e regulação de polarização.

A microscopia por varredura eletrônica foi utilizada para verificar a morfologia dos cristais de TIBr. Este método permite observar a homogeneidade e qualidade estrutural em uma escala bem mais ampliada (10 a 20.000X) que a MO (1 a 1.000X). Neste trabalho, a análise de MEV foi gentilmente realizada pelo Dr. Rafael H. L. Garcia do CCN/IPEN;

O Microscópio eletrônico de Varredura, MEV (Scanning Electron Microscope, SEM) (Figura 33) é um equipamento versátil que permite a obtenção de informações estruturais e químicas de amostras diversas. Um feixe fino de elétrons de alta energia incide na superfície de amostra onde, ocorrendo uma interação, parte do feixe é refletida e coletada por um detector que converte este sinal em imagem de elétrons retroespalhados (BSE ou ERE) e nesta interação a amostra emite elétrons produzindo a chamada ES (elétrons secundários). Ocorre também a emissão de raios-X que fornece a composição química elementar de um ponto ou região da superfície, possibilitando a identificação de praticamente qualquer elemento presente (SANTOS, 2016).

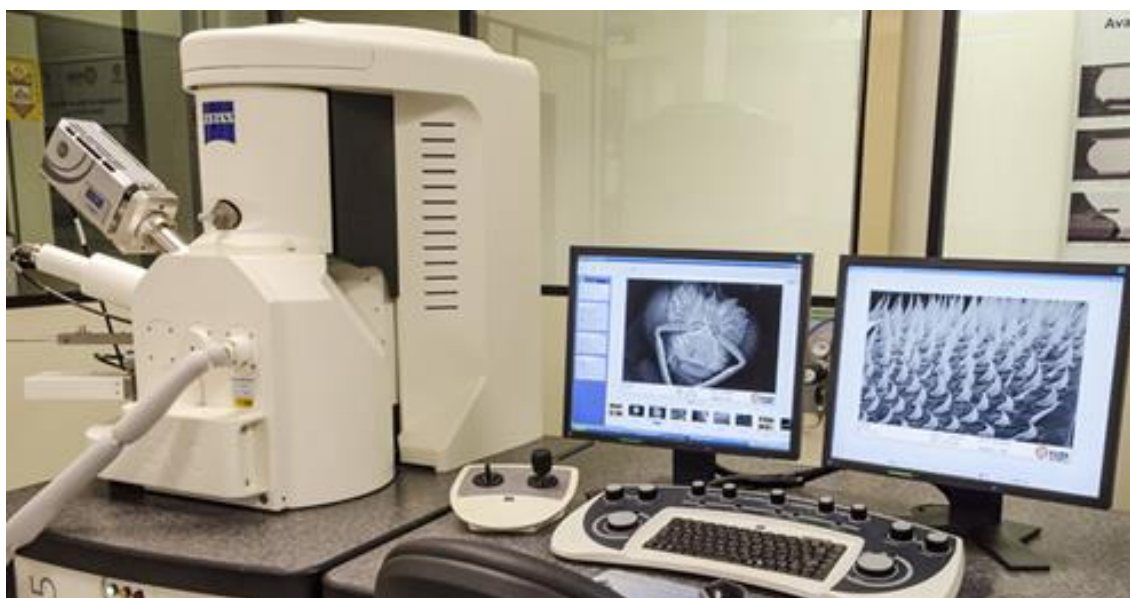
A análise de microscopia eletrônica de varredura foi realizada para verificar a morfologia e a composição química elementar do arenito pulverizado. Este método permite observar a homogeneidade e qualidade estrutural em uma escala bem mais ampliada (10-20.000 X). Esta análise foi realizada, em colaboração com CCTM, utilizando um microscópio eletrônico de varredura marca LX 30 da Philips.

**Figura 32.** Microscópio da marca Leica, modelo DM-750M.



**Fonte:** [https://www.leica-microsystems.com/typo3temp/\\_processed\\_/d/7/csm\\_leica-dm750-m\\_9f4a1caa01.jpg](https://www.leica-microsystems.com/typo3temp/_processed_/d/7/csm_leica-dm750-m_9f4a1caa01.jpg), 2019.

**Figura 33.** Microscopia por Varredura Eletrônica (MEV).



**Fonte:** <http://unisinis.br/itt/images/servicos/fuse/microscopia-eletronica-varredura-mev.jpg>, 2019.

#### 4.4.4 Tomografia Computadorizada (CT)

As medidas tomográficas foram realizadas utilizando um tomógrafo de terceira geração desenvolvido no CTR/IPEN, mostrado na Figura 34.

**Figura 34** Tomógrafo de terceira geração



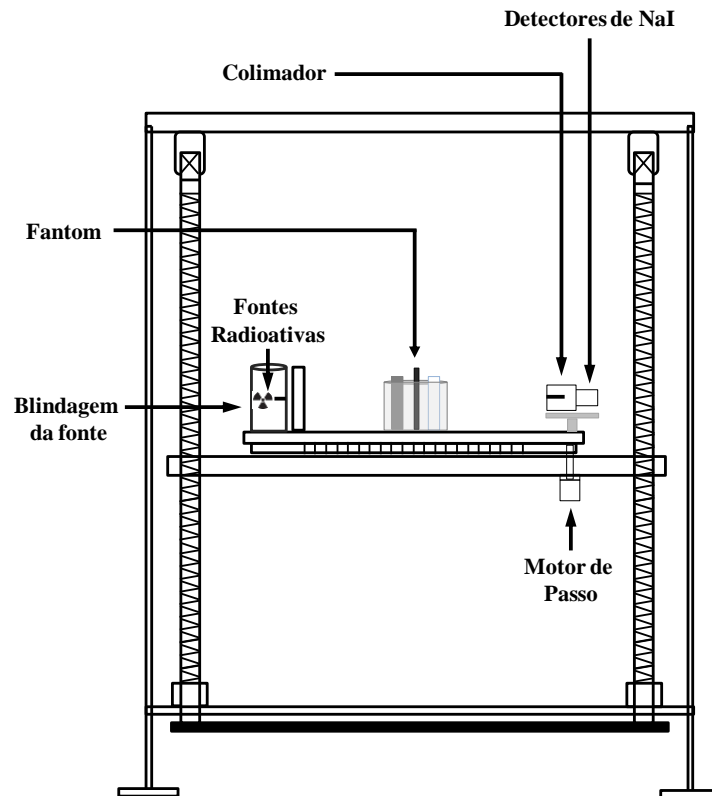
**Fonte:** Autoria própria, 2018.

O sistema tomográfico construído no CTR é constituído de um arranjo com espaço para quinze detectores de NaI(Tl) de 25,4 mm de diâmetro x 50,8 mm de espessura, com espaçamentos iguais entre si, e geometria em arco (*fan beam*), posicionado diametralmente oposto a um porta fonte de chumbo que pode conter uma ou várias fontes radioativas de diferentes energias. Os detectores estão colimados com um material composto de chumbo com septos de  $\varnothing 5,0 \times 50$  mm (diâmetro e comprimento), e estão localizados acima de um suporte, que é controlado por um motor de passo, diametricamente oposto à fonte radioativa. O número de detectores a ser utilizado está relacionado ao tamanho do objeto de estudo. Quanto maior o objeto, mais detectores são necessários, quanto menor o objeto, menos detectores são utilizados. (MESQUITA et al, 2016; VELO, 2018).

Este tomógrafo possui dois movimentos: (1) movimento dos detectores; e (2) o movimento da mesa. No primeiro movimento, o suporte que contém os detectores é rotacionado pelo motor de passo. Esta rotação serve para registrar mais raios por projeção. Ao final do movimento dos detectores, a mesa rotacional um determinado ângulo pré-estabelecido, fazendo com que todo o sistema rotacione junto. Após a rotação da mesa, inicia – se novamente a rotação dos detectores, assim por diante, até completar 360°. A eletrônica associada e sistema de aquisição de dados acoplados ao tomógrafo foram desenvolvidos no CTR/IPEN. O sistema de aquisição de dados do tomógrafo é de multicanal (256 canais/ detector), sendo possível utilizar múltiplas fontes radioativas, ou fontes radioativas que emitem mais do que uma energia, como por exemplo,  $^{192}\text{Ir}$  (317, 468 e 604 keV). Para cada energia registrada, é possível reconstruir uma imagem, conseqüentemente, nesse sistema de multicanal, para uma única rotação, é possível obter mais do que uma imagem. A Figura 35 e 36 mostram o esquema do tomógrafo de terceira geração.

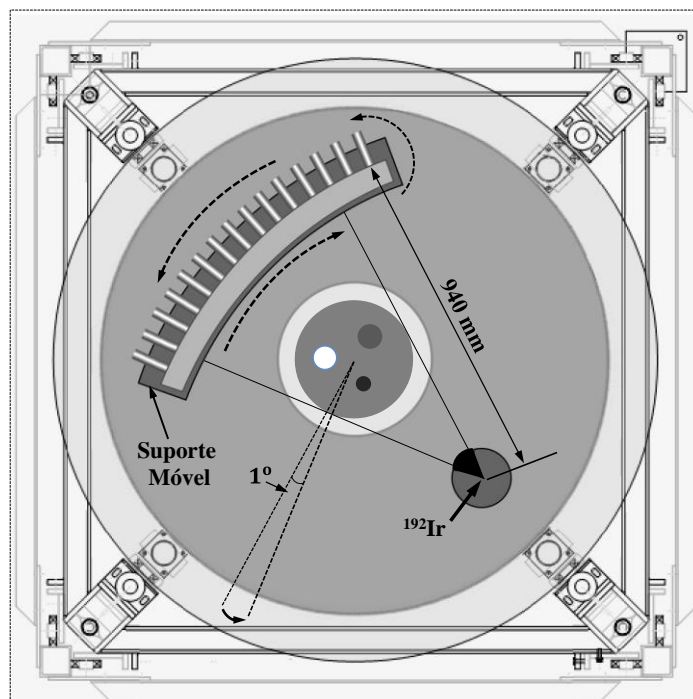
No presente trabalho as medidas tomográficas foram realizadas utilizando oito detectores do sistema e uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  de aproximadamente 11.1 GBq (300 mCi) de atividade. Cada detector movia 17 passos (0,23°/passo), em que, ao final deste movimento, 153 raios por projeção foram obtidos. Posteriormente à realização dos 17 passos, o sistema todo rotacionou 1°. Esta seqüência de movimentos foi repetida até que todo o sistema completasse 360°. O tempo de aquisição foi de 6 segundos por passo, totalizando 36 720 segundos (17,5 horas) para uma volta completa. Esse sistema foi descrito previamente por MESQUITA et al(2016) e VELO(2018).

**Figura 35 – Esquema do sistema tomográfico utilizado**



Fonte: VELO, 2018.

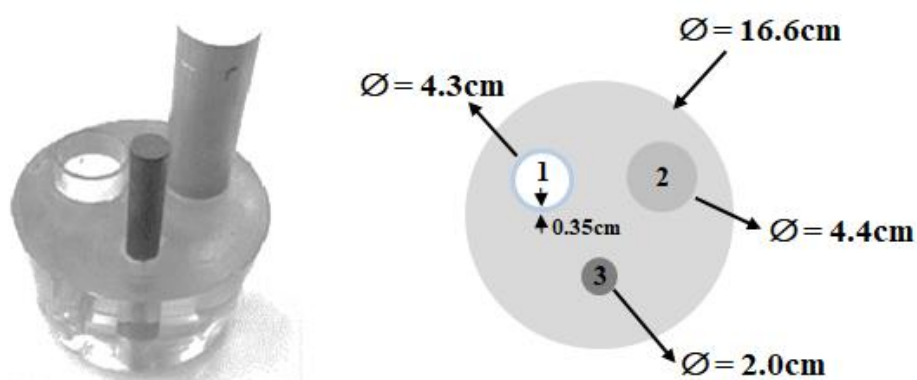
**Figura 36 – Vista superior do tomógrafo**



Fonte: VELO, 2018..

As análises dos algoritmos desenvolvidos foram feitas com base nos dados obtidos de um fantom multifásico (MESQUITA, VELO, CARVALHO, MARTINS, HAMADA, 2016). Este fantom é composto de Polimetilmetacrilato [PMMA ( $\rho = 1,19 \text{ g/cm}^3$ )], preenchido com uma barra de ferro ( $\rho = 7,874 \text{ g/cm}^3$ ), uma de alumínio ( $\rho = 2,698 \text{ g/cm}^3$ ) e um tubo de vidro contendo ar, como mostra a Fig. 37.

**Figura 37** –Imagem do fantom multifásico composto por PMMA, preenchido com tubo de vidro (1) e barras de alumínio (2) e ferro (3)



Fonte: VELO, 2018.

Posteriormente, medidas tomográficas foram realizadas utilizando as amostras das rochas seca, úmida e úmida contendo Cloreto de Bário preparadas conforme descritas no sub-captítulo 4.2.1. Todas as medidas foram realizadas nas mesmas condições e parâmetros utilizados para a medida tomográfica no fantom.

As imagens foram reconstruídas utilizando o método de retroprojeção filtrada (FBP), com algoritmos e análises desenvolvidos no software Matlab® r2013b por Velo, (2018).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do tempo de propagação da onda no solo em cada ponto de variação de umidade, já descontados o *time delay*, das 5 amostras com diferentes umidades, são mostrados na Tabela 05:

**Tabela 05:** Frequência x Tempo de Propagação útil.

Frequências/Amostra	Tempo de propagação útil ( $t$ )( $\mu$ s)				
	1	2	3	4	5
5 kHz	320	380	660	610	680
7 kHz	324	384	656	606	660
10 kHz	328	396	660	610	664
12 kHz	326	392	658	608	694
15 kHz	322	400	662	612	698
20 kHz	332	0	664	614	700
Média	325	390	660	610	683

**Fonte:** Autoria própria, 2018.

Com a obtenção dos dados de propagação da onda, foi realizado o cálculo do módulo de cisalhamento máximo ( $G_{m\acute{a}x}$ ) do solo ensaiado em cada etapa de acréscimo de umidade no ensaio de compactação, utilizando a equação 1. A seguir, foi obtido os dados de resistência ao cisalhamento nas mínimas deformações (0,001%) do solo sob variações de umidade e densidade, que são mostrados na Tabela 06.

**Tabela 06:** Umidade e  $G_{m\acute{a}x}$

	1	2	3	4	5
<b>Umidade (%)</b>	4,94	5,70	6,26	9,03	13,10
<b><math>G_{m\acute{a}x}</math> (MPa)</b>	220,30	182,99	66,62	63,67	33,98

**Fonte:** Autoria própria, 2018.

Na Tabela 07 são sumarizados os valores de velocidade de propagação da onda de cisalhamento ( $V_s$ ) associada aos dados obtidos no ensaio de compactação de Proctor, como a densidade seca ( $\rho_d$ ), índice de vazios ( $e$ ), teor de umidade ( $W$ ), grau de saturação ( $S$ ) e porosidade ( $\eta$ ) correspondentes:

**Tabela 07:** Velocidade de propagação de onda de cisalhamento ( $V_s$ ).

Amostra	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e$	$W$ (%)	$S$ (%)	$\eta$ (%)	$V_s$ (m/s)
1	1,81	0,436	4,9	29,5	30,4	291,1
2	1,86	0,395	5,7	37,4	28,3	265,3
3	1,87	0,392	6,3	41,6	28,1	160,1
4	1,78	0,461	9,0	51,0	31,5	156,5
5	1,57	0,659	13,1	51,7	39,7	114,3

**Fonte:** Autoria própria, 2018

Os resultados do ensaio para a aferição da permeabilidade do solo são mostrados na Tabela 08:

**Tabela 08:** Permeabilidade do solo

Amostra	$h$ (cm)	$V_{\text{Água}}$ (cm <sup>3</sup> )	$L$ (cm)	$t$ (min ->sec)	$t$ (sec)	(total)	$k$ (cm/s)
1	165	500	15,3	780	5,45	785,45	$3,34 \times 10^{-4}$

**Fonte:** Autoria própria, 2018.

O coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) obtido no ensaio indica uma permeabilidade alta, sendo um resultado coerente com um solo arenítico, oriundo de rocha reservatório (PINTO, 2006).

O ensaio para obtenção do limite de plasticidade foi realizado, porém, com a não moldagem do cilindro de 3mm de diâmetro do respectivo solo, de acordo com a NBR 7180 (1984), pode-se concluir que o solo não é plástico.

Na análise da composição dos elementos presentes realizada utilizando a Fluorescência de Raios X, inúmeros elementos foram determinados, como apresentados na Tabela 09. Por inferência foram estimados os valores dos



elementos na forma de óxido, como sumarizados na Tabela 10. Como pode ser observado nesta tabela, o arenito analisado é predominantemente composto de  $\text{SiO}_2$  (76%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20%), seguido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (2,3%). Outros óxidos identificados estão presentes na faixa de ppm.

**Tabela 09:** Composição dos elementos presentes na rocha arenito Botucatu

FÓRMULA	Z	CONCENTRAÇÃO	NET INT	ERRO
Si	14	74,300%	422,900	0,159%
Al	13	17,500%	122,000	0,297%
Fe	26	5,010%	218,200	0,223%
Ti	22	1,260%	12,070	0,967%
K	19	0,959%	6,074	1,360%

Fonte: Autoria própria, 2018.

**Tabela 10:** Composição dos óxidos presentes na rocha arenito Botucatu

FÓRMULA	Z	CONCENTRAÇÃO	NET INT	ERRO
$\text{SiO}_2$	14	75,900%	422,900	0,159%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13	20,200%	122,000	0,297%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	26	2,290%	218,200	0,223%
$\text{TiO}_2$	22	0,698%	12,070	0,967%
$\text{K}_2\text{O}$	19	0,392%	6,074	1,360%

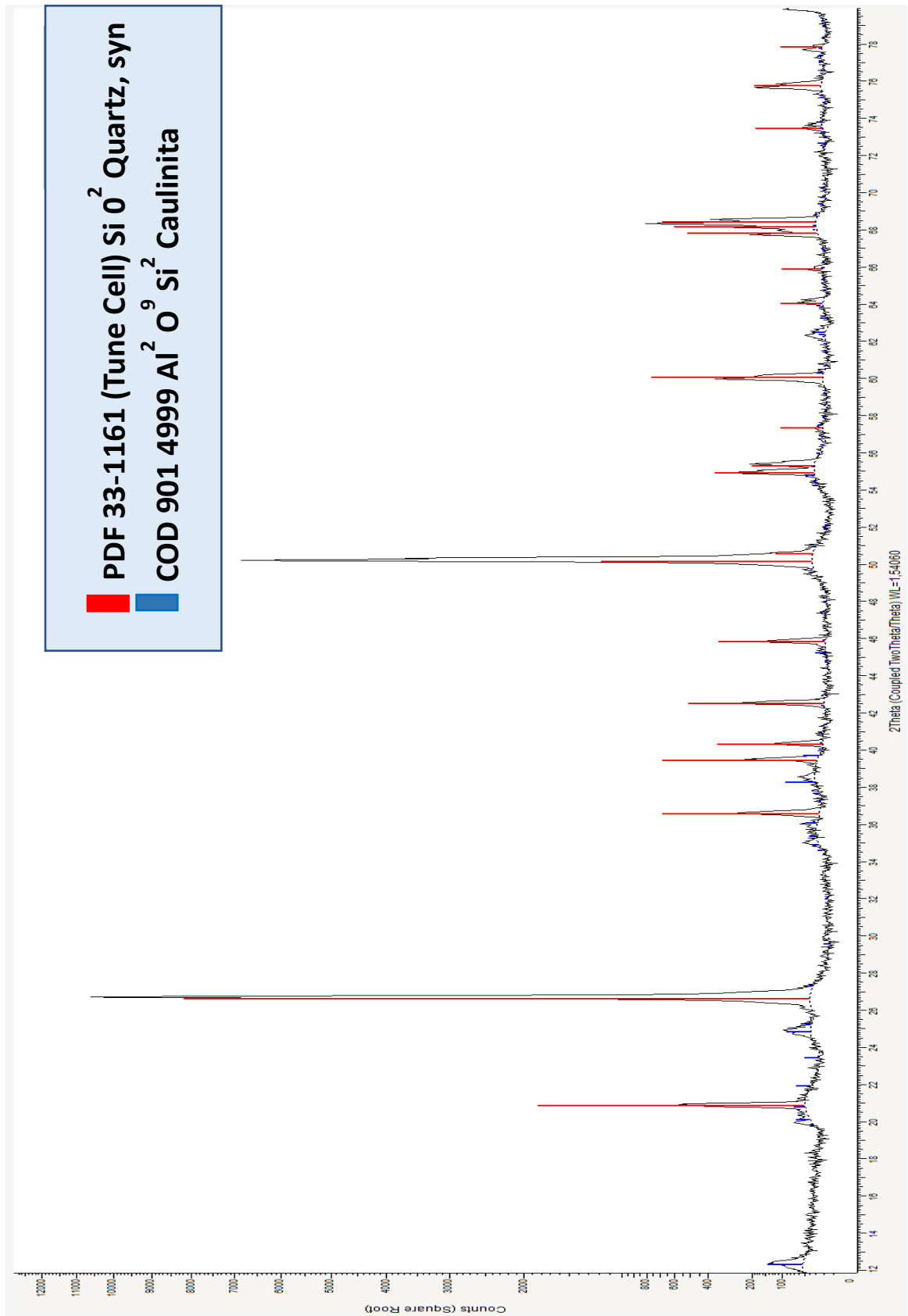
Fonte: Autoria própria, 2018.

A difração de raios X é uma técnica que pode ser aplicada à investigação das rochas arenitos devido à sua baixa granulometria natural destas espécies minerais. Na Figura 38 encontra-se o difratograma da amostra da rocha arenito Botucatu em linha preta, adicionalmente, os difratogramas dos padrões de  $\text{SiO}_2$  de Quartzo (PDF-33-116 – *Tune Cell*) e de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$  de caolinita (IICOD9014999) são apresentadas em linhas vermelhas e azul, respectivamente.

Como pode ser visto nesses difratogramas, as amostras da rocha arenito

apresentaram picos relativos a ambos os padrões, indicando a presença de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$  corroborando os resultados obtidos nas medidas de Fluorescência de Raio X, onde esses elementos encontram-se na proporção de 76% de  $\text{SiO}_2$  e 20% de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$ . No difratograma da amostra de arenito não foram observados picos relativos ao de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , provavelmente devido a sua baixa concentração de 2,3%, determinada pela técnica de Fluorescência.

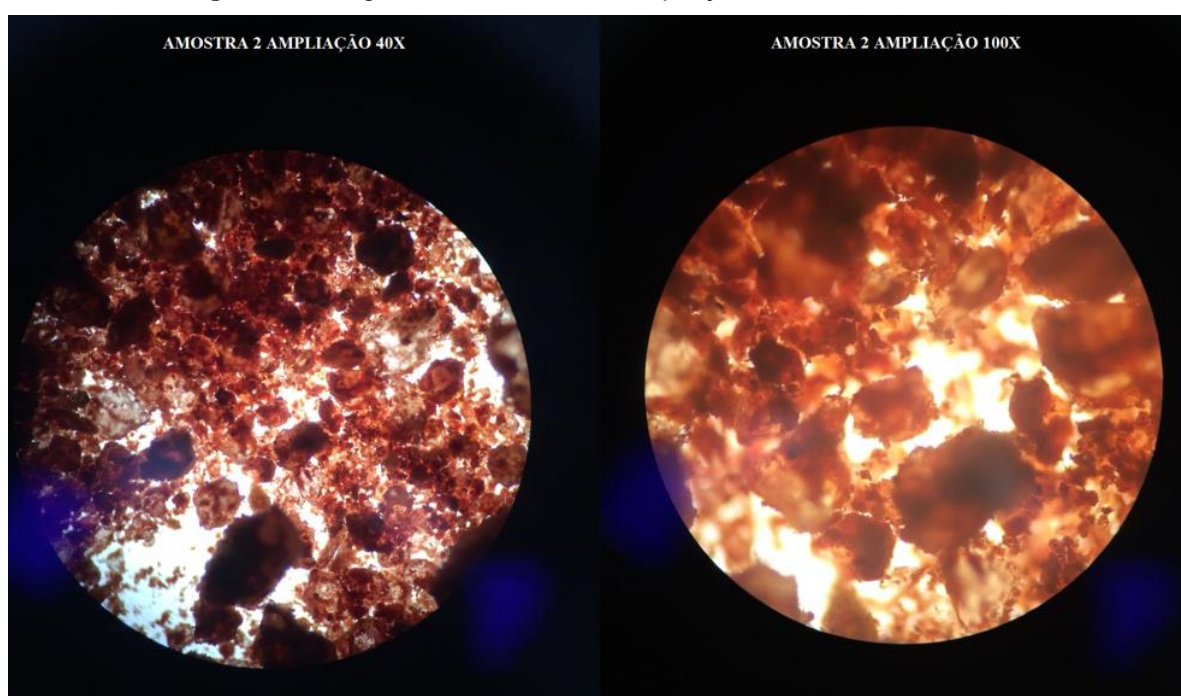
Figura 38. Difratoograma de Raios X da amostra da rocha arenito Botucatu



Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Figura 39 são apresentadas as imagens da amostra de arenito obtidas por microscopia ótica, ampliadas 40 e 100 vezes. Embora, a resolução da imagem pela técnica de MO seja mais baixa do que por MEV, pode-se notar a estrutura da superfície. Como pode ser observada apresenta características de solo arenoso, possuindo traços de argila e formada basicamente de minérios, que provavelmente deve ser de predominância de quartzo e caulinita. Os grãos são típicos de areia de desertos, isto é, bem selecionados. Isso caracteriza bons reservatórios.

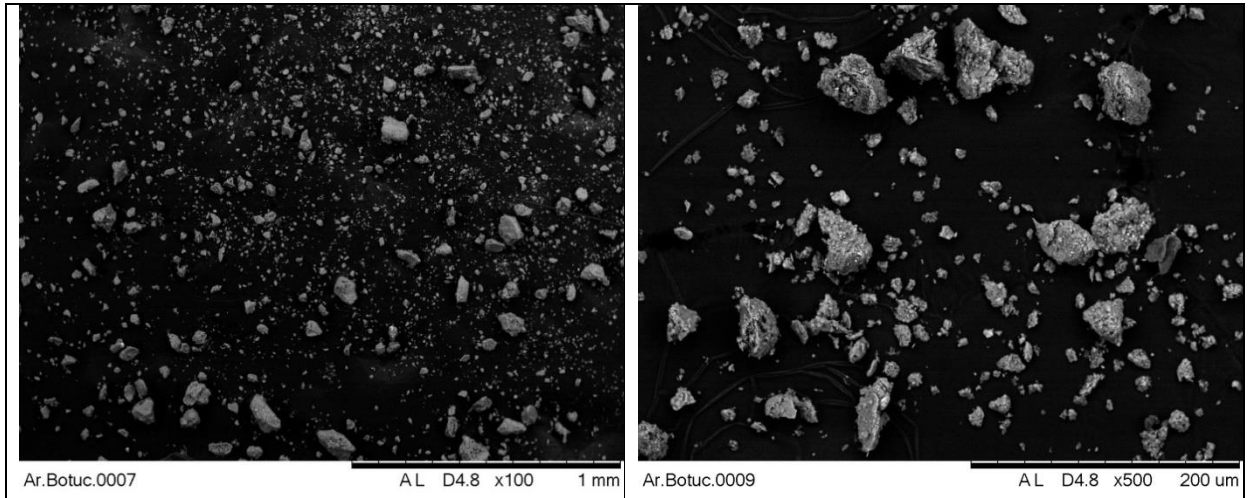
**Figura 39.** Imagens da amostra com ampliação de 40 e de 100 vezes.



**Fonte:** Autoria Própria, 2018

Figura 40 ilustra as imagens da morfologia da rocha obtidas pelo MEV ampliadas 100 e 500 vezes. enquanto a Figura 41 apresenta as imagens ampliadas 1000, 1200, 1500, 2000 e 2500 vezes. As imagens obtidas pelo MEV permitem avaliar a estruturas em cada granulometria.

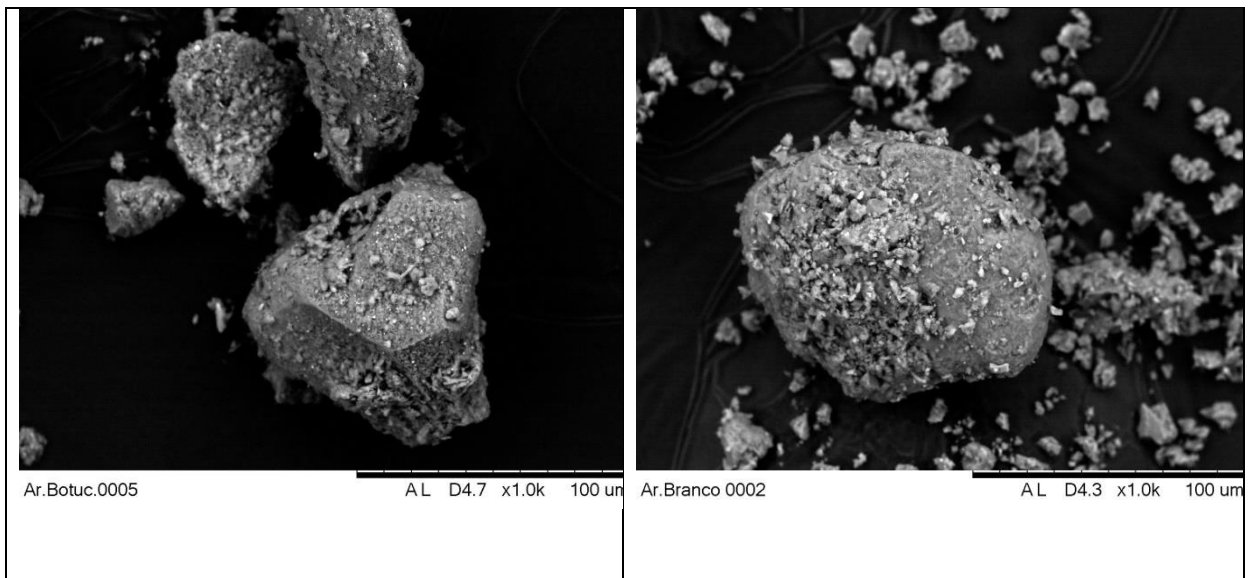
**Figura 40.** Imagens da rocha arenito Botucatu ampliadas 100 e 500 vezes.

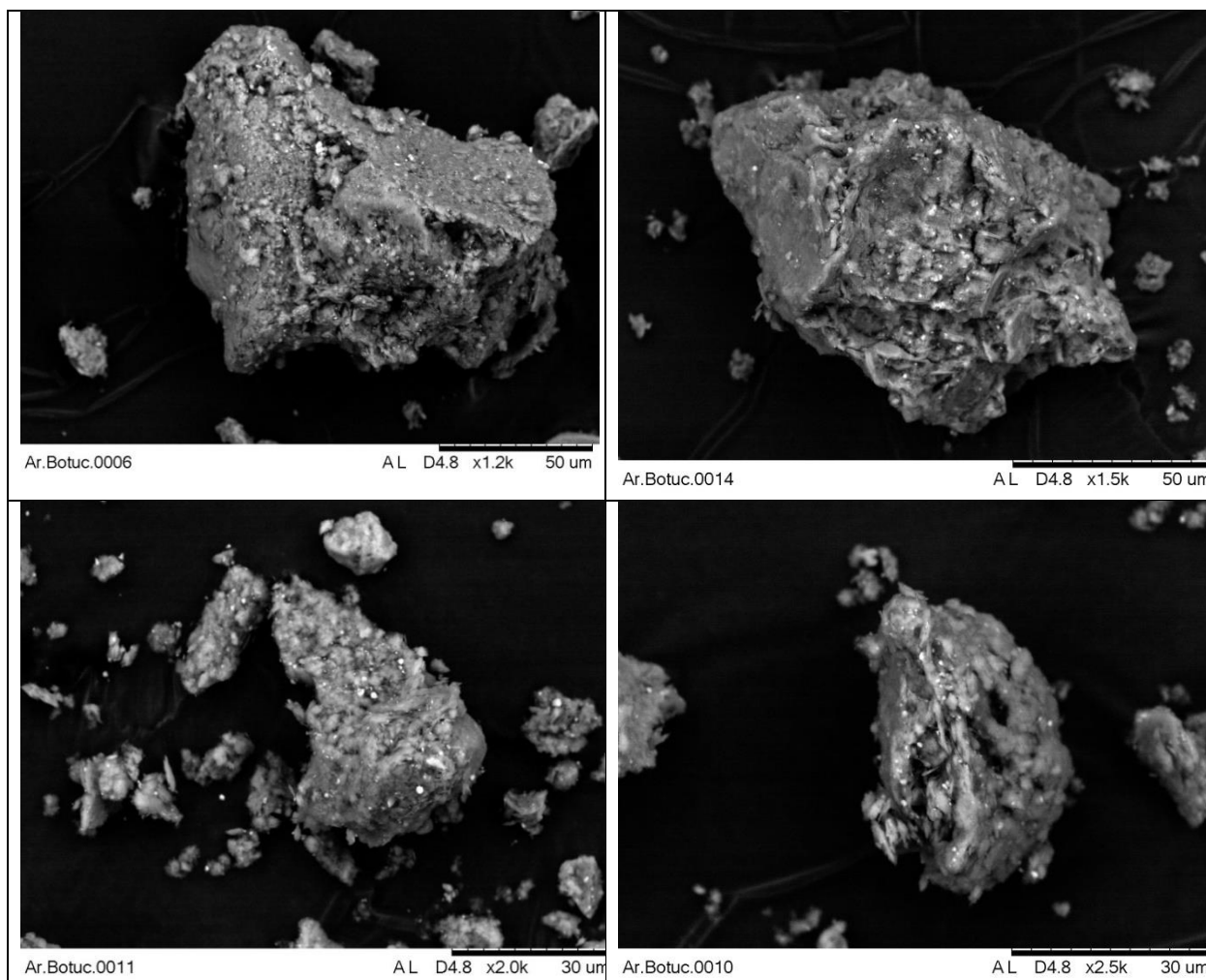


**Fonte:** Autoria Própria, 2018

Na imagem ampliada 100 e 500 vezes (Figura 40), observam-se areias finas e os núcleos por estarem dispersos não conferiram cimentação, confirmando a sua característica de rocha reservatório.

**Figura 41.** Imagens da rocha arenito Botucatu ampliadas da rocha arenito Botucatu ampliadas 1000, 1200, 1500, 2000 e 2500 vezes.



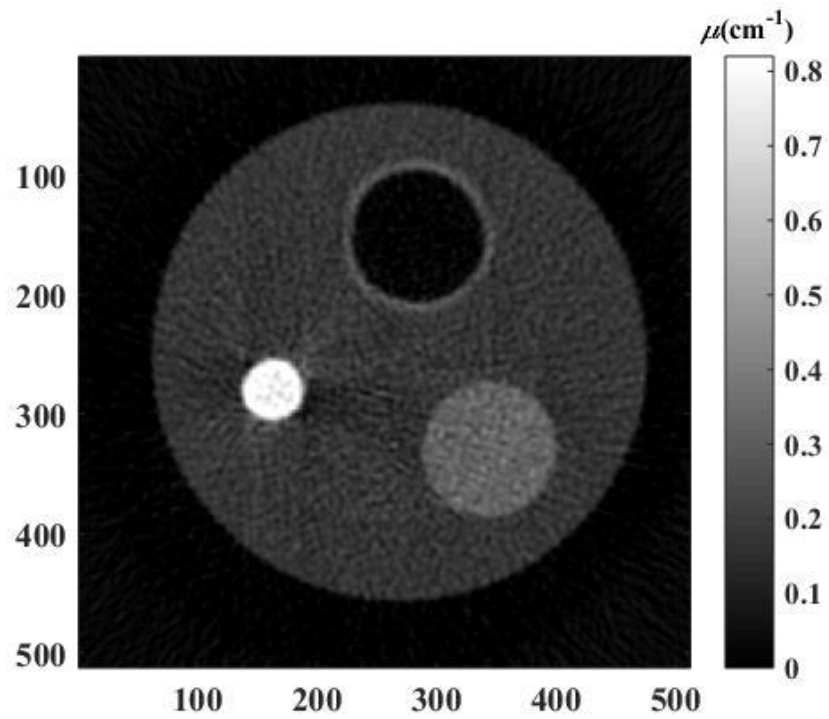


**Fonte:** Autoria Própria, 2018

Nas imagens apresentadas na Figura 41 com maior ampliação (ampliação de 1000, 1200, 1500, 2000 e 2500 vezes) é possível identificar a estruturação das camadas de deposição de óxidos, provavelmente de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em um núcleo provavelmente de quartzo.

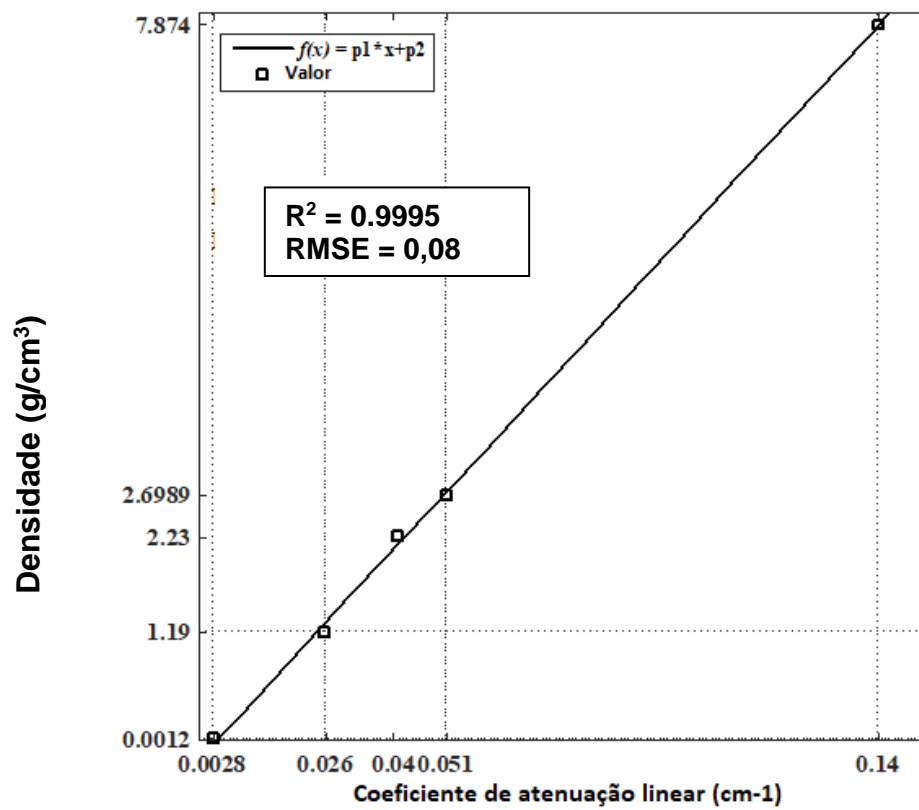
A Figura 42 apresenta a imagem reconstruída do fantom multifásico utilizando um algoritmo FBP. A partir desta imagem, foi calculada a média do coeficiente de atenuação linear dos objetos: ar, PMMA (Polimetilmetacrilato), vidro, alumínio e ferro; posteriormente, foi correlacionada com suas respectivas densidades, conforme mostra a Figura 43.

Figura 42. Image reconstruida do fantom multifásico.



Fonte: Velo, A.F., 2019

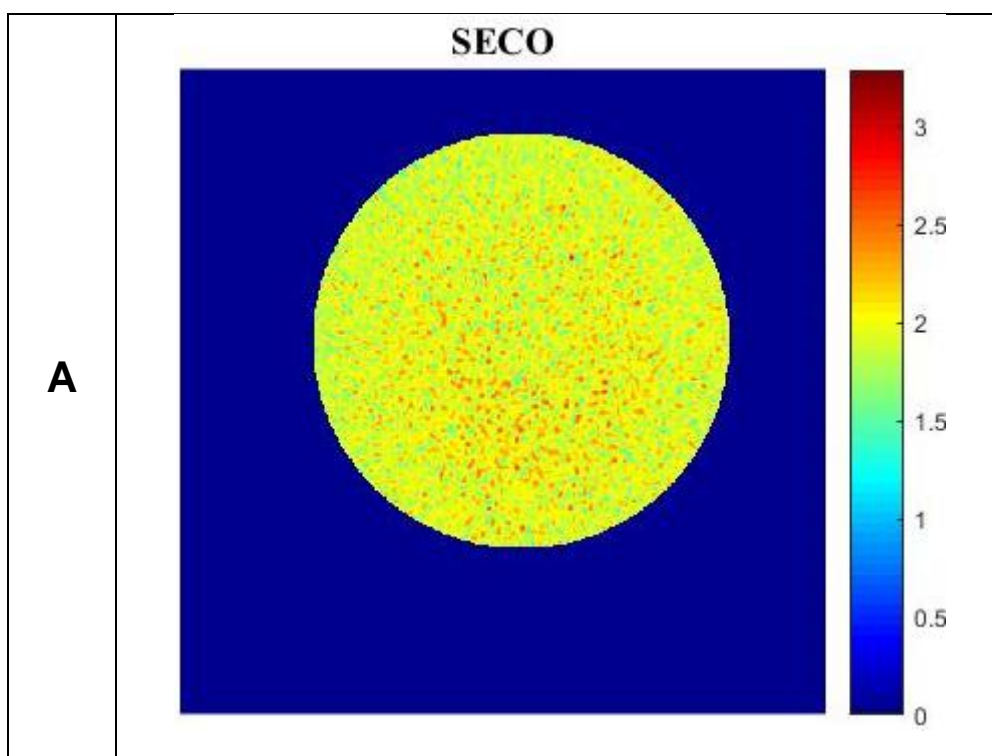
Figura 43. Relação entre Densidade x Coeficiente de Atenuação Linear.



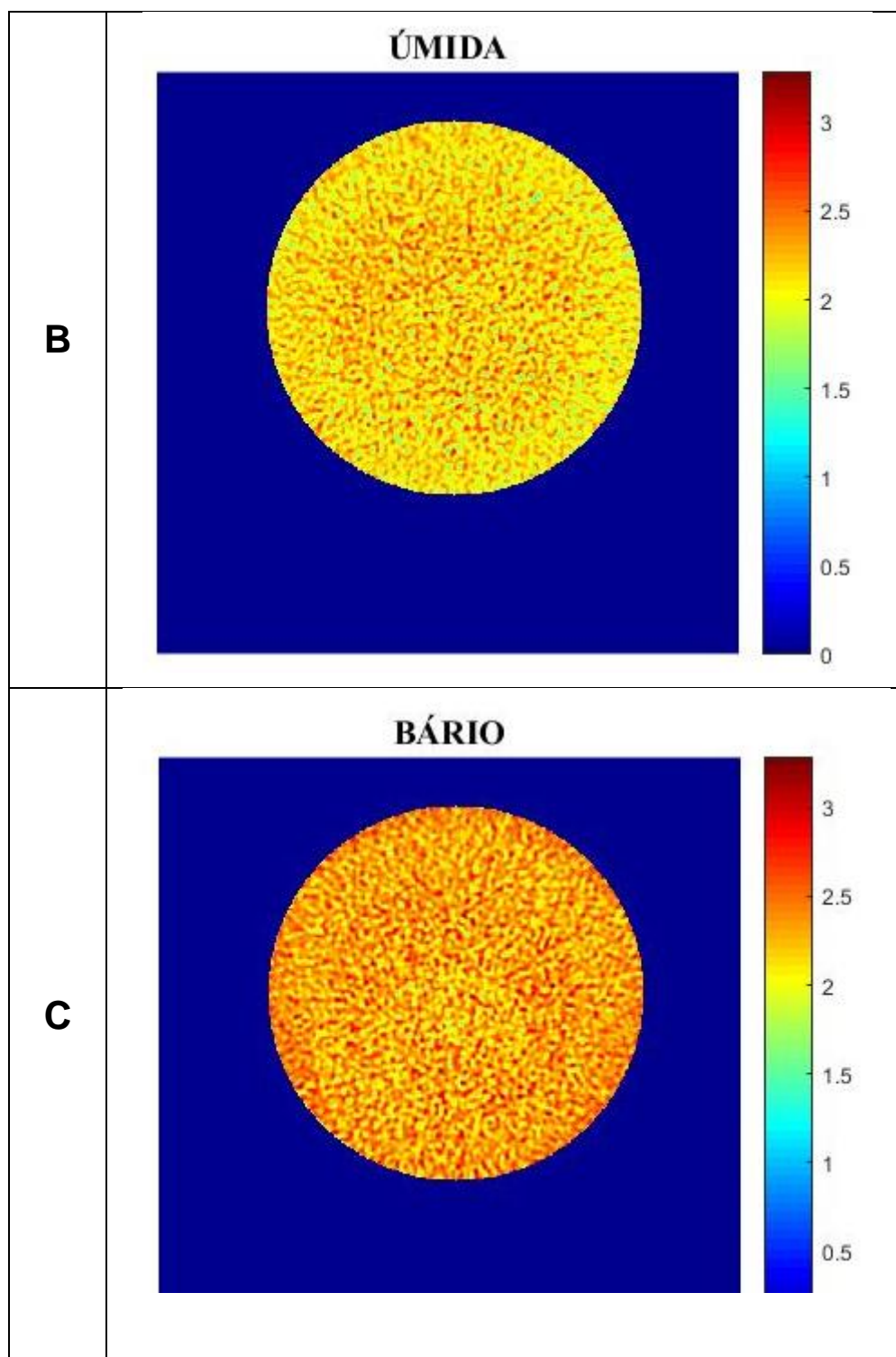
Fonte: Velo, A.F., 2019

A Figura 44 apresenta as imagens reconstruídas das três amostras das rochas preparadas, a saber, seca (Figura 44(A)), úmida (Figura 44(B)) e úmida contendo cloreto de bário (Figura 44(C)). O valor do índice da barra de cores representa a densidade. Uma alta resolução na configuração da tomografia computadorizada foi obtida com parâmetros selecionados, como pode ser observado na Figura 44, embora tenha sido obtida uma baixa resolução temporal, exigindo 17,5 horas para obter cada imagem tomográfica. Pode ser observada que a partir dessas imagens que a densidade da rocha é aumentada para a rocha úmida comparada à seca que pode ser atribuída provavelmente à absorção da água nas partículas de pó das rochas. A partir da curva da relação densidade x coeficiente de atenuação linear (Figura 43), diferentes materiais de densidade podem ser avaliados na amostra de rocha. A partir da imagem reconstruída por inferência à curva apresentada na Figura 43, na análise da composição das amostras das rochas, algumas partículas com densidade ao redor de  $3,5 \text{ g/cm}^3$  foram encontradas para imagem reconstruída com amostra da rocha contendo Bário. Esse valor estimado sugere que essas partículas são provavelmente de Bário, pois estão muito próximas do valor da densidade de Bário, ou seja,  $3,51 \text{ g/cm}^3$ .

**Figura 44.** Imagens reconstruídas das amostras de rochas seca (A), rocha úmida (B) e rocha úmida contendo Bário (C),



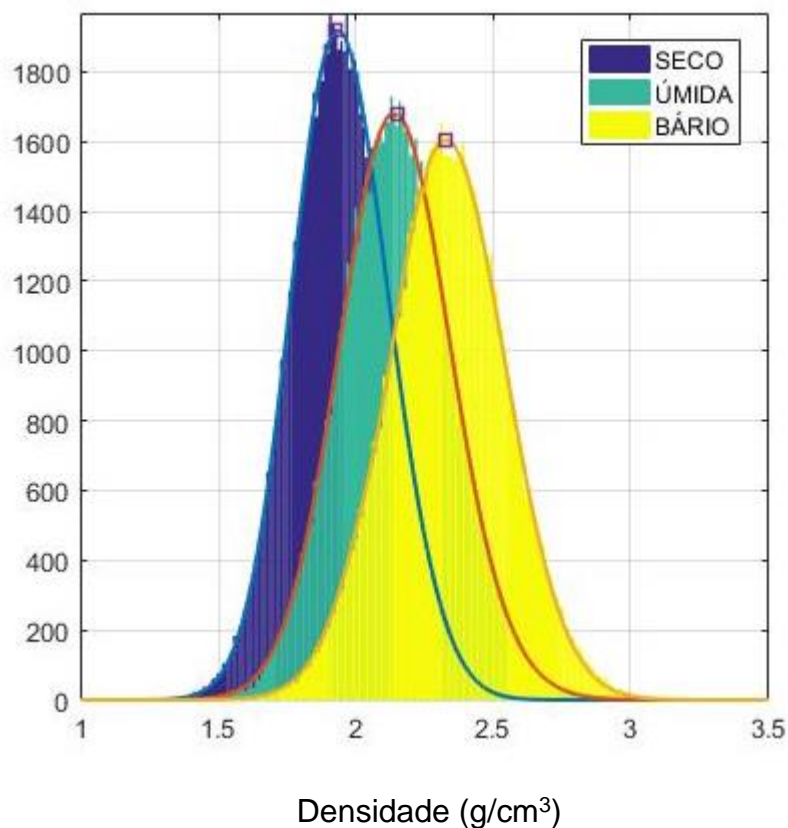




Na Figura 45 é mostrado o histograma traçado a partir das densidades obtidas das imagens tomográficas, cada qual representa uma densidade, por inferência a curva da relação densidade x coeficiente de atenuação linear (Figura 43) demonstra nitidamente o aumento de densidade nas rochas úmidas e úmidas contendo o bário,

evidenciando a sua capacidade de absorção de água, indicando que são rochas reservatórios, com potencial para armazenamento de águas.

**Figura 45:** Histograma da distribuição de valores de densidade para rochas seca, úmida e úmida contendo Bário.



## 6 CONCLUSÕES

A velocidade de cisalhamento ( $V_s$ ) mostrou estar associado a diferentes parâmetros da rocha, tais como, a densidade seca ( $\rho_d$ ), índice de vazios ( $e$ ), teor de umidade ( $W$ ), grau de saturação ( $S$ ) e porosidade ( $\eta$ ).

O coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) obtido no ensaio foi de  $3,34^{-04}$  cm/s, que está coerente com um solo arenítico, oriundo de rocha reservatório.

O ensaio para obtenção do limite de plasticidade evidenciou que o solo não é plástico devido a impossibilidade de realizar uma moldagem do cilindro de 3mm de

diâmetro do respectivo solo.

O arenito analisado pela técnica de fluorescência de Raios X é predominantemente composto de  $\text{SiO}_2$  (76%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20%), seguido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (2,3%). Outros óxidos identificados estão presentes na faixa de ppm.

Como pode ser visto nos difratogramas do raios X, as amostras da rocha arenito apresentaram picos relativos  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  corroborando os resultados obtidos nas medidas de Fluorescência de Raio X. No difratograma da amostra de arenito não foram observados picos relativos ao de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , provavelmente devido a sua baixa concentração de 2,3%, determinada pela técnica de Fluorescência.

Os estudos pela técnica de MEV demonstraram que as rochas coletadas não apresentaram cimentação nas suas estruturas, indicando que são rochas reservatórios, com potencial para armazenamento de águas.

Uma boa resolução foi obtida nas imagens reconstruídas das três amostras das rochas, a saber, seca, úmida e úmida contendo bário, pelas medidas realizadas no tomógrafo de terceira geração.

A distribuição das densidades das partículas das rochas pode ser claramente observada no histograma construída pelas intensidades dos pixels das imagens. O aumento da densidade das rochas úmidas e misturadas com cloreto de bário foi observado comparado a da rocha seca, indicando que a rocha estudada tem alto poder absorção de água, sugerindo um alto potencial como reservatório de água.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M & BARBOSA, O. Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo. Bol Div. Geol. Min., DNPM, 1953, 143:1-96.
- ALMEIDA, F.F.M. Botucatu, um deserto triássico da América do Sul. Div. Geol. Min, DNPM, Notas Preliminares e Estudos, 1954, 86:1-21.
- AKIN, S.; KOVSCEK, A.R. Heavy-oil solution gas drive: a laboratory study. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 35, p. 33–48, 2002.
- BIGARELLA, J. J. e SALAMUNI, R. (1967). The Botucatu Formation. (inglês) IN BOYER, C.; FANGET, B. Measurement of liquid flow distribution in trickle bed reactor of large diameter with a new gamma-ray tomographic system. Chem. Eng. Sci., v. 57, p. 1079–1089, 2002.
- BRAZ, D.; LOPES, R.T. Computed tomography: Evaluation of Stability Tests and Indirect Tensile Strength of Field Asphalt Mixtures. NDT & E International, v. 33, p. 522, 2000..
- BROOKS, R. A.; DICHIRO, G. Principles of computer-assisted tomography (CAT) in radiographic, radioisotope imaging. ng. Phys. Med. Biol., v. 21, p. 689, 1976
- CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T. Bacia do Paraná: Formações Pirambóia e Botucatu. IN: Congresso Brasileiro de Geologia, 37. São Paulo. Roteiro de excursão São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1992, n. 2 , p. 1-19.
- CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T. A composição faciológica das formações Pirambóia e Botucatu no centroleste paulista e a delimitação do contato entre as unidades. IN: Simpósio de Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná. 1., Rio Claro. Boletim de resumos. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 1993, p. 93.
- CAETANO-CHANG, M.R., WU F.T. Diagênese de arenitos da Formação Piramboia no centro leste Paulista. Revista Geociências, 2003, 22:33-47.
- CARNEIRO, C.D.R. 2007. Viagem virtual ao Aquífero Guarani em Botucatu (SP): Formações Pirambóia e Botucatu, Bacia do Paraná.
- CARVALHO, D. V. S. ; MARCATO, L. A. ; HAMADA, M. M. ; MARTINS, J. F. T. ; SANTOS, R. A. dos ; COSTA, F. E. da ; MESQUITA, C. H. . Development of a data acquisition system containing 12 units type 8-bit multichannel (256 multichannel) for use in industrial tomography. In: XXXIII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, 2010, Campos do Jordão. XXXIII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, 2010.

- CAVALCANTE J.C., CUNHA H.C.S., CHIEREGATI L.A., KAEFER L.Q., ROCHA J.M., DAITX E.C., COUTINHO M.G.N, YAMAMOTO K., DRUMOND J.B.V., ROSA D.B., RAMALHO R. Projeto Sapucaí – Estados de Minas Gerais e São Paulo. Relatório Final de Geologia. Brasília. DNPM/CPRM, 1979.
- CHANG, H. K. 2006. Utilização atual do Aquífero Guarani. In: Jornada Estadual Aquífero Guarani, 1, Botucatu, SP, 2006 (cd – rom).
- CHAOUKI, J., LARACHI, F., DUDUKOVIC, M. Noninvasive Tomographic and Velocimetric Monitoring of Multiphase Flows. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.36 p.4476-4503, 1997.
- CHEN, J.; KEMOUN A. Comparative hydrodynamics study in a bubble column using computerautomated radioactive particle tracking (CARPT)/computed tomography (CT) and particle image velocimetry (PIV), *Chem. Eng. Sci.*, v. 54, p. 2199-2207, 1999.
- CORMACK, A.M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. *J. Appl. Phys.*, v. 34, p. 2722 – 2727, 1963.
- CULLITY, B. D. ***Elements of x-ray diffraction***. 3a Ed. Massachusetts, Addison-wesley publishing company, inc., 1956.
- DAS, Braja. M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. São Paulo: Thomson, 2014.
- DEROUIN, C.; NEVICATO, D. Hydrodynamics of Riser Units and Their Impact on FCC Operation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 36, p. 4504-4515, 1997.
- DU, B; FAN, L. Gas and Solids Mixing in a Turbulent Fluidized Bed. *A.I.Ch.E. J.*, v. 48, n. 9, p. 1896-1909, 2002.
- FADERANI, S.; TFIZFIN, U. Discharge and transport of nearly buoyant granular solids in liquids Part I: Tomographic study of the interstitial voidage effects governing flow regimes. *Chem. Eng. Sci.*, v. 53, n. 3, p. 553-574, 1998.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391 p.
- FOKEER, S.; KINGMANA, S. Characterisation of the cross sectional particle concentration distribution in horizontal dilute flow conveying—a review. *Chem. Eng. Proc.* Article in press. 2003.
- GESICKI, A. L. D. G. 2007. Evolução diagenética das Formações Pirambóia e Botucatu (Sistema Aquífero Guarani) no Estado de São Paulo. 2007. 175p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.

- GOMES, M. A. F. et al. Caracterização das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil: base para uma proposta de gestão sustentável. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 20 p. Documentos, 52.
- GONZAGA DE CAMPOS, L.F. Secção geológica. In: São Paulo, Comissão Geographica e Geológica. Relatório... São Paulo, 1889. p. 21-34.
- HOUNSFIELD, G.N. A method and apparatus for examination for a body by radioation such as X –or gamma radiation. British Patent No. 1,283,915.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) –1.981 – Mapa geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000, São Paulo – SP, IPT: Vol. 1 e Vol. 2.
- KAK, A., SLANEY, M. Principles of Computerized Tomographic Imaging. Society of Industrial and Applied Mathematics, Electronic Copy. P 49-112.
- LUCAS, M. C. Influência da precipitação e do uso do solo sobre a taxa de recarga em zona de afloramento do sistema Aquífero Guarani. 2012. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- MANZIONE, R. L. Águas subterrâneas: conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar. Jundiaí: Paco editorial, 2015. 388 p.
- MASSOLI, M. 2007. Caracterização litofaciológica das formações Pirambóia e Botucatu, em subsuperfície, no município de Ribeirão Preto (SP) e sua aplicação na prospecção de águas subterrâneas /Marcos Massoli. – Rio Claro : [s.n.], 2007.
- MATONIS, D.; GIDASPOW, D. CFD Simulation of Flow and Turbulence in a Slurry Bubble Column. A.I.Ch.E. J., v. 48 n. 7, p. 1413-1429, 2002.
- MESQUITA, C.H., VELO, A.F., CARVALHO, D.V.S., MARTINS, J.F.T., M.M. HAMADA, Industrial tomography using three different gamma ray. Flow Measurement and Instrumentation, v. 47, p. 1 -9, 2016;
- MONTANHEIRO, T. J., ARTUR A. C., MONTANHEIRO F., NEGRI F. A., GESICKI A. L., BOGGIANI P. C. Investigação Tecnológica de arenitos silicificados da Formação Botucatu (NE do Paraná) para uso como rocha de revestimento. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 30, n. 2, p. 237-251, 2011.
- OLDENDORF, W.H. Isolated flying-spots detection of radio-densities discontinuities displaying the internal structural pattern of a complex object. IRE Trans. Bio-Electron. BME, v. 8, p. 68-72, 1961.
- PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos, 3. ed. São Paulo: Editora Oficina

de Textos, 2006.

RAMLAKHAN, M. Promotion of Deactivated Sintering by Dry- Particle Coating, A.I.Ch.E. J., v. 49 n. 3, p. 604-618, 2003.

SALVADOR, P.A.V., Análise de Sistemas Multifásicos utilizando tomografia computadorizada Gama Monoenergética e Polienergética. Tese de Doutorado, IPEN/ATN, 2008.

SANDERSON, J.; RHODES, M. Hydrodynamic Similarity of Solids Motion and Mixing in Bubbling Fluidized Beds. A.I.Ch.E. J., v. 49, n. 9, p. 2317-2327, 2003.

SANTOS, R.A. Estudo da influência de impurezas e da qualidade das superfícies em cristais de brometo de tálio para aplicação como um detector de radiação. Tese de Doutorado, IPEN/ATN, 2016.

SANYAL, J.; VASQUEZ, S. Numerical simulation of gas –liquid dynamics in cylindrical bubble column reactors. Chem. Eng. Sci., v. 54, p. 5071-5083, 1999.

SOARES P.C. O Mesozóico gonduânico no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade Estadual Paulista, 152p. 1973.

SOARES P.C. Divisão Estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. Rev. Bras. Geoc., 5:229-251. 1975.

SOARES P.C., BARCELLOS P.E., CSORDAS S.M. Lineamentos em imagens Landsat e Radar e suas implicações no conhecimento tectônico da Bacia do Paraná. In: INPE/CNPq, Simp. Bras. Sensoriamento Remoto, 2, Anais, p. 143-167. 1982.

SCHIEWE, K.E.; TUZLA, K. Measurements of Solid Concentration in a Downward Vertical Gas – Solid Flow. A.I.Ch.E. J., v. 45 n. 5, p. 949-955, 1999

SCHEMBRE, J.M.; KOVSCEK, A.R. A technique for measuring two-phase relative permeability in porous media via X-ray CT measurements. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 39, p. 159– 174, 2003.

SIMONS, S.J.R. Imaging techniques for fluidized bed systems: a review. Chem. Eng. J., v. 56, p. 83-93, 1995.

SOARES, P. C. (1972) Arenito Botucatu e Pirambóia no Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 26., Belém, Resumos. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1972, p. 250-251.

VAN LANDEGHEM, F.; NEVICATO, D. Fluid catalytic cracking: modeling of an industrial riser. Applied Catalysis A, v. 138, p. 381-405, 1996.

VAN SATEN, H.; KOLAR, Z. Double beam and detector  $\gamma$ -radiation attenuation

gauge for studying bubble phenomena in gas-solid fluidized beds. *Appl. Rad. Isotopes*, v. 48, n. 10-12, p. 1307-1312, 1997.

VELO, A.F. Análise da aplicação de diferentes algoritmos de reconstrução de imagens tomográficas de objetos industriais. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. 116p, 2018.

VIEIRA, A.J. Geologia do centro e nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo. In. SBG – Congr. Bras. Geol., 28, Anais, 1973, p. 259-277.

VIRGILIO, F.N.F., Técnicas Analíticas Nucleares de Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (ed-xrf) e por Reflexão Total (txrf).

WANG, S.J.; GELDART, D. A behaviour of a catalyst powder flowing down in a dipleg. *Chem. Eng. J.*, v. 77, p. 57-63, 2000.

WASHBURNE, C.W. Petroleum geology of State of São Paulo. *Bol. Com. Geogr. Geol. Do Est. De São Paulo*, 22:1-282

WEIMAR, A.; GYURE, D. Application of  $\gamma$ -radiation density gauge for determining hydrodynamic properties of fluidized beds. *Powder Technol.*, v. 44, n. , p. 179-194, 1994.

WILLIAMS, R.A.; ILYAS, O.M. Air core imaging in cyclonic separators: implications for separator desing and modelling. *Chem. Eng. J.*, v. 56, p. 135-141, 1995.

WU, F. T. – 1.981 – Minerais pesados das seqüências arenosas paleozóica e mesozóica no centro leste do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 78 p.

YATES, J.; SIMONS, S. Experimental methods in fluidization research. *Int. J. Multiphase Flows*, v. 20, n. , p. 297-330, 1994.

YIN, F.; AFACAN, A. Liquid holdup distribution in packed columns: gamma ray tomography and CFD simulation. *Chem. Eng. Proc.*, v. 41, p. 473–483, 2002.

<https://www.rigaku.com/sites/default/files/miniflex.jpg>, acessado em 15/04/2019

[https://cdn.caeonline.com/images/shimadzu\\_edx-900hs\\_305570-prev.jpg](https://cdn.caeonline.com/images/shimadzu_edx-900hs_305570-prev.jpg), acessado em 15/04/2019

[https://www.leica-microsystems.com/typo3temp/\\_processed\\_/d/7/csm\\_leica-dm750-m\\_9f4a1caa01.jpg](https://www.leica-microsystems.com/typo3temp/_processed_/d/7/csm_leica-dm750-m_9f4a1caa01.jpg), acessado em 15/04/2019

<http://unisin.br/itt/images/servicos/fuse/microscopia-eletronica-varredura-mev.jpg>, acessado em 15/04/2019.



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000  
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908  
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil  
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**