

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR  
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

**Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares**

**JULIETA MARIA BEZERRA FIGUEIRÔA DE ARAÚJO**

**IDENTIFICAÇÃO DA POTENCIALIDADE DE AMOSTRAS  
GEOLÓGICAS PARA INSPEÇÃO DE PETRÓLEO  
UTILIZANDO TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA GAMA**

**Recife, PE**

**Fevereiro, 2018**

**JULIETA MARIA BEZERRA FIGUEIRÔA DE ARAÚJO**

**IDENTIFICAÇÃO DA POTENCIALIDADE DE AMOSTRAS  
GEOLÓGICAS PARA INSPEÇÃO DE PETRÓLEO  
UTILIZANDO TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA GAMA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Aplicação de Radioisótopos na Indústria e Medicina.

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas**

**Co-orientador: Prof. Dr. Enivaldo Santos Barbosa**

**Recife, PE**

**Fevereiro, 2018**

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

A663i Araújo, Julieta Maria Bezerra Figueirôa de.

Identificação da potencialidade de amostras geológicas para inspeção de petróleo utilizando tomografia computadorizada gama. / Julieta Maria Bezerra Figueirôa de Araújo. - Recife: O Autor, 2018.

72 f. : il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas.

Coorientador: Prof. Dr. Enivaldo Santos Barbosa.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2018.

Inclui referências bibliográficas.

1. Rocha reservatório. 2. Atenuação gama. 3. Densidade. 4. Porosidade. I. Dantas, Carlos Costa, orientador. II. Barbosa, Enivaldo Santos, coorientador. III. Título.

CDD 621.48 (21. ed.)

UFPE

BDEN/2018-12

**JULIETA MARIA BEZERRA FIGUEIRÔA DE ARAÚJO**

**IDENTIFICAÇÃO DA POTENCIALIDADE DE AMOSTRAS  
GEOLÓGICAS PARA INSPEÇÃO DE PETRÓLEO  
UTILIZANDO TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA GAMA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Aplicação de Radioisótopos na Indústria e Medicina.

**APROVADA EM: 27.02.2018**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira – DEMEC/UFPE**

---

**Prof. Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva – DEN/UFPE**

---

**Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino – DEN/UFPE**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus por me sustentar em todo momento, pois Deus *“nunca dará um fardo que não possa carregar...”* (1 Coríntios 10:13).

Em segundo, agradeço aos meus familiares, meus pais José Fernando Novais Figueirôa e Aurea Maria Bezerra Figueirôa pelo total apoio e carinho, meus filhos Maria Beatriz e Guilherme que estiveram sempre ao meu lado e em especial ao meu marido, companheiro, conselheiro e amigo, Wedson Márcio por me incentivar, acreditar e por dividir comigo todos os bons e maus momentos.

Aos meus queridos amigos, Edyelle, Thalita, Bruna, Carlos, Victor que me motivaram e fizeram parte desta jornada.

À minha fiel companheira, Marcela Marques, por compartilhar sua sabedoria e amizade, não tenho palavras para descrever tal apreço.

Aos amigos do Grupo de Tomografia Gama e Fluidodinâmica do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da UFPE que contribuíram com este trabalho, aos cuidados e zelo de Zacarias Barbosa.

Aos mestres que colaboraram com as disciplinas do curso e com a minha formação.

Ao meu orientador Prof. Carlos Costa Dantas por compartilhar sua experiência e conhecimento, ao meu co-orientador Prof. Enivaldo Barbosa pelo suporte, paciência e pela grande contribuição na realização desta dissertação.

À banca examinadora professores Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, Mário Augusto Bezerra da Silva e Antônio Celso Dantas Antonino, pela contribuição deste trabalho.

À CAPES pelo suporte financeiro para realizar esta pesquisa.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização desta conquista.

## RESUMO

Propriedades petrofísicas de rochas são, usualmente, obtidas em laboratório através de experimentos padrões em amostras de testemunhos retirados do reservatório. Como propriedades importantes citam-se: porosidade, densidade, permeabilidade. Estas medições são, em geral, de alto custo e em alguns casos significativamente demoradas. Por outro lado, o avanço de técnicas de análise por tomografia computadorizada, aplicadas em seções planas de rochas, vem se mostrando uma metodologia rápida e de baixo custo para a predição destas propriedades, a partir unicamente do conhecimento da microestrutura da rocha. A Tomografia Computadorizada é um método de exploração e análise não destrutivo, que gera a informações de uma seção (geralmente transversal) de um corpo qualquer. A importância da tomografia computadorizada está na capacidade de distinguir quantitativamente pequenas diferenças na atenuação da radiação no corpo examinado, de modo que esta diferença pode ser relacionada às diferenças de densidades físicas no corpo. Assim, esta pesquisa apresenta um método para a estimativa de propriedades petrofísicas utilizando a análise dos dados de intensidade da radiação gama das amostras de rochas utilizando a tomografia computadorizada gama do Laboratório Prof. Dr. Cornelius Keller do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Para isto, foi proposta a confecção de amostras com materiais conhecidos (Alumínio e o Policloreto de Vinila) a fim de observar a resposta desses materiais, comparando com os valores teóricos fornecidos pelo código computacional XCOM: Photon Cross Sections Database da National Institute of Standards and Technology (NIST), validando o método para as amostras geológicas. Sendo assim, o erro relativo entre as densidades aparente (método convencional) e radiométrica (método pela transmissão gama) foi menor que 2,11% para as amostras conhecidas e menor que 6% para as amostras de rocha. E quanto a porosidade foi possível perceber as proximidades entre os métodos correspondentes a este trabalho. Estes resultados obtidos permitiram concluir que o método empregado neste trabalho apresenta vantagem em relação ao método convencional na determinação da densidade e porosidade em rochas reservatórios.

**Palavras-chave:** Rocha Reservatório. Atenuação Gama. Densidade. Porosidade.

## ABSTRACT

Petrophysical properties of rocks are usually obtained in the laboratory by standard experiments on samples of samples taken from the reservoir. Important properties include: porosity, density, permeability. These measurements are generally costly and in some cases significantly time-consuming. On the other hand, the advancement of computed tomography analysis techniques, applied in flat sections of rocks, has been shown to be a fast and low cost methodology for the prediction of these properties, based solely on the knowledge of the rock microstructure. Computed Tomography is a non-destructive scanning and analysis method that generates information from a (usually transverse) section of any body. The importance of computed tomography lies in the ability to quantitatively distinguish small differences in attenuation of radiation in the examined body, so this difference may be related to differences in physical densities in the body. Thus, this research presents a method for the estimation of petrophysical properties using the gamma ray intensity data analysis of rock samples using gamma computed tomography from the Prof. Laboratory. Dr. Cornelius Keller of the Department of Nuclear Energy (DEN) of the Federal University of Pernambuco (UFPE), for this purpose it was proposed to make samples with known materials (Aluminum and Vinyl Polychloride) in order to observe the response of these materials in comparison with the theoretical values provided by the XCOM Computational Code: Photon Cross Sections Database of the National Institute of Standards and Technology (NIST), validating the method for the geological samples. Thus, the relative error between the apparent (conventional method) and radiometric densities (gamma transmission method) was lower than 2.11% for known samples and less than 6% for rock samples. As for the porosity, it was possible to perceive the proximity between the methods corresponding to this work. These results allowed to conclude that the method used in this work presents an advantage over the conventional method in determining the density and porosity in reservoir rocks.

**Key words:** Rock Reservoir. Attenuation Gamm., Density. Porosity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Reservatório típico de petróleo e gás .....	14
Figura 2 - Localização da rocha reservatório .....	15
Figura 3 - Fotomicrografia da rocha reservatório mostrando a porosidade e os poros conectados .....	15
Figura 4 - Extração de testemunhos de uma rocha reservatório.....	16
Figura 5 – Processo geológicos (a) porosidade primária e (b) porosidade secundária.....	17
Figura 6 – Definição de porosidade.....	18
Figura 7 - Sistema tomográfico de primeira geração .....	22
Figura 8 - Esquema mostrando a atenuação de um feixe de raios gama incidente em uma amostra de densidade $\rho$ e espessura $x$ .....	24
Figura 9 - Ilustração do esquema da metodologia utilizada neste trabalho.....	26
Figura 10 - Instrumentos utilizados nas medições.....	27
Figura 11 – Vista superior dos <i>phantoms</i> - <i>Al</i> e <i>PVC</i> .....	30
Figura 12 – Diagrama da quantidade de amostras em estudo .....	30
Figura 13 - Vista frontal dos três testemunhos geológicos.....	31
Figura 14 – Vista frontal dos <i>phantoms</i> .....	31
Figura 15 - Vista superior dos <i>phantoms</i> .....	32
Figura 16 - Equipamento utilizado na porosimetria (a) UltraPoroPerm 500, (b) Copo matriz	35
Figura 17 – O TGI – 1° utilizado no experimento .....	37
Figura 18 – Fluxograma do procedimento experimental.....	38
Figura 19 - Perfis das amostras com suporte, caracterizando o movimento de translação, com direção do feixe e angulação .....	38
Figura 20 - Interface do programa de controle automático da TGI – 1°.....	40
Figura 21 – Intervalo da energia de fotopico do $^{137}\text{Cs}$ .....	41
Figura 22 – Materiais homogêneos utilizados no experimento .....	42
Figura 23 - Esquema da variação da espessura ao longo do raio .....	44
Figura 24 – Relação entre o coeficiente de atenuação linear e a densidade radiométrica aparente para a calibração do sistema tomográfico utilizando dos materiais homogêneos .....	49

Figura 25 – Representação dos perfis verticais do <i>phantom</i> físico de <i>Al</i> .....	50
Figura 26 – Representação dos perfis verticais do <i>phantom</i> físico de <i>PVC</i> .....	51
Figura 27 – Comparativo entre os perfis verticais dos <i>phantoms</i> físicos .....	53
Figura 28 – Perfis verticais dos testemunhos geológicos .....	54
Figura 29 – Comparação entre a variação dos ângulos de rotação e os perfis dos <i>phantoms</i> ..	56
Figura 30 – Comparação entre a variação dos ângulos de rotação e os perfis dos testemunhos geológicos .....	57
Figura 31 – Distribuição da atenuação sofrida em relação a posição radial das amostras em estudo.....	60
Figura 32 - Distribuição da atenuação sofrida em relação a posição radial nas amostras geológicas .....	60
Figura 33 - Representação da Densidade Radiométrica Aparente - $\rho_{rap}$ (g/cm <sup>3</sup> ). .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Instrumentos utilizados nesse estudo.....	26
Tabela 2 - Medidas dos testemunhos de rocha reservatório.....	31
Tabela 3 - Medidas dos <i>phantoms</i> .....	32
Tabela 4 - Parâmetros selecionados para as varreduras no TGI – 1º.....	39
Tabela 5 – Valores médios das medidas, densidades e porosidade das amostras em estudo ...	47
Tabela 6 - Comparação entre os valores obtidos, XCOM e encontrados na literatura com respectivas referências para a energia de 662 keV do <sup>137</sup> Cs.....	48
Tabela 7 - Valores das densidades obtidos experimentalmente e comparados com as densidades dos materiais conhecidos no XCOM para energia de 662 keV do <sup>137</sup> Cs .....	49
Tabela 8- Valores teóricos de referência dos <i>phantoms</i> no NIST XCOM, para a energia de 662 keV do <sup>137</sup> Cs .....	58
Tabela 9 – Comparativo entre as medidas do coeficiente de atenuação de massa dos <i>phantoms</i> e os valores de referência do XCOM, para a energia de 662keV do <sup>137</sup> Cs .....	58
Tabela 10 – Valores médios do coeficiente de atenuação linear dos perfis dos testemunhos geológicos, para a energia de 662 keV do <sup>137</sup> Cs.....	59
Tabela 11 – Valores das densidades dos materiais em estudo. ....	62
Tabela 12 – Comparação entre os valores de porosidade nas amostras .....	63
Tabela 13 – Valores das porosidades entre os métodos convencional e radiométrico.....	64

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos e Metas.....</b>	<b>13</b>
1.1.1	Geral .....	13
1.1.2	Específicos.....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Geologia das Rochas Reservatório.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Porosidade .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>Testes Não Destrutivos .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Tomografia Computadorizada.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Método de Transmissão da Radiação .....</b>	<b>23</b>
2.5.1	Atenuação dos Raios Gama.....	23
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Dimensões .....</b>	<b>26</b>
3.1.1	Os Erros de Medição .....	27
<b>3.2</b>	<b>Descrição das amostras .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3</b>	<b>Método Gravimétrico .....</b>	<b>32</b>
3.3.1	Determinação do Volume.....	32
3.3.2	Determinação da Densidade Aparente ( $\rho_{ap}$ ).....	33
3.3.3	Determinação da Densidade do Meio Material ( $\rho_m$ ) .....	34
3.3.4	Determinação da Porosidade ( $\phi$ ) .....	34
<b>3.4</b>	<b>Arranjo Experimental.....</b>	<b>36</b>
3.4.1	Tomografia Gama.....	36
3.4.2	Tomógrafo Gama Industrial de 1ª Geração (TGI-1º) .....	36
<b>3.5</b>	<b>Planejamento do Experimento .....</b>	<b>37</b>
3.5.1	Condições de Operação .....	38
3.5.2	Coeficiente de Atenuação Linear ( $\mu$ ).....	41
3.5.3	Reta de Calibração do Sistema Tomográfico Experimental.....	42
<b>3.6</b>	<b>Método Radiométrico.....</b>	<b>43</b>

3.6.1	Determinação da Densidade Radiométrica Aparente ( $\rho_{rap}$ ) .....	43
3.6.2	Obtenção da Porosidade ( $\phi$ ) .....	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise do Método Gravimétrico .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise do Método de Transmissão Gama .....</b>	<b>48</b>
4.2.1	Reta de Calibração .....	48
4.2.3	Avaliação da Intensidade Relativa ( $I_0 / I$ ) .....	50
4.2.4	Medidas do Coeficiente de Atenuação Linear ( $\mu$ ) .....	58
4.2.5	Medidas da Densidade Radiométrica Aparente ( $\rho_{rap}$ ) .....	61
4.2.6	Cálculo da Porosidade ( $\phi$ ) .....	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>PERSPECTIVAS.....</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Pesquisas associadas à identificação do potencial das rochas para avaliação e inspeção utiliza parâmetros petrofísicos essenciais para descrever o comportamento de materiais porosos, como densidade e porosidade, sendo de grande interesse para várias áreas da engenharia, tais como: rochas reservatório (MELANI, 2015).

Uma grande parte de estudos em rochas reservatório utiliza metodologias convencionais. No entanto, o método de transmissão de raios X e gama é mais preciso, rápido e permite resultados sem interferir na integridade da amostra (POTTKER, 2000).

O estudo da metodologia de transmissão de raios X e gama em amostras de solo e rocha em laboratório foi introduzido por PHOGAT e AYLMOORE (1989), aplicando a Tomografia Computadorizada (TC) que é uma técnica que utiliza radiação ionizante de forma não invasiva e que permite avaliar a variação no coeficiente de atenuação da radiação interagindo com a amostra.

Dessa forma é bastante utilizada em Testes Não Destrutivos (TND), que são métodos capazes de proporcionar informações a respeito do teor de defeitos de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, equipamentos e estruturas sem danificá-los (ABENDI, 2013).

Pelas vantagens da TC ser uma técnica não destrutiva, não havendo a necessidade de qualquer preparação física e química da amostra, além de ser uma técnica para as pesquisas com porosidade, de forma a auxiliar nas pesquisas de exploração de petróleo e os tipos de sedimentos que o influenciam, bem como a redução do custo total para realizar uma pesquisa em pequena escala, gerando benefícios futuros para efetividade na exploração petrolífera (ALVES, 2012).

Sendo assim, a TC é uma técnica que tem obtido boa repercussão, considerando a resolução e a possibilidade de investigar materiais sem necessidade de seccioná-los (CRESTANA e NIELSEN, 1990), tratando-se de uma técnica ideal para análise e determinação de meios porosos e da densidade, propostos nesse trabalho. O presente trabalho seguirá o seguinte roteiro:

No capítulo 2, segue a revisão das literaturas abordando sobre o uso da tomografia gama para as propriedades físicas de uma rocha reservatório.

No capítulo 3, são detalhados os materiais de uso deste trabalho, além da técnica de exposição para a escolha dos parâmetros selecionados no tomógrafo gama.

No capítulo 4 é exposto os resultados de cada item apreciado no capítulo anterior.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões pertinentes a esta pesquisa e por fim no capítulo 6 são mostradas as perspectivas para complementação deste trabalho.

## **1.1 Objetivos e Metas**

### 1.1.1 Geral

- Desenvolver um método de análise para amostras geológicas utilizando as tomografias computadorizadas gama, a fim de identificar a potencialidade para inspeção em regiões petrolíferas.

### 1.1.2 Específicos

- Analisar e comparar as características físicas, como densidade e porosidade das amostras geológicas com materiais de características conhecidas como Alumínio (*Al*) e Policloreto de Vinila (*PVC*);
- Analisar as intensidades coletadas pela tomografia gama;
- Calcular o coeficiente de atenuação linear e comparar com valores de referência do código computacional NIST XCOM;
- Comparar as densidades dos materiais pelo método gravimétrico e radiométrico;
- Estimar e validar a porosidade das amostras por meio de equações da literatura.

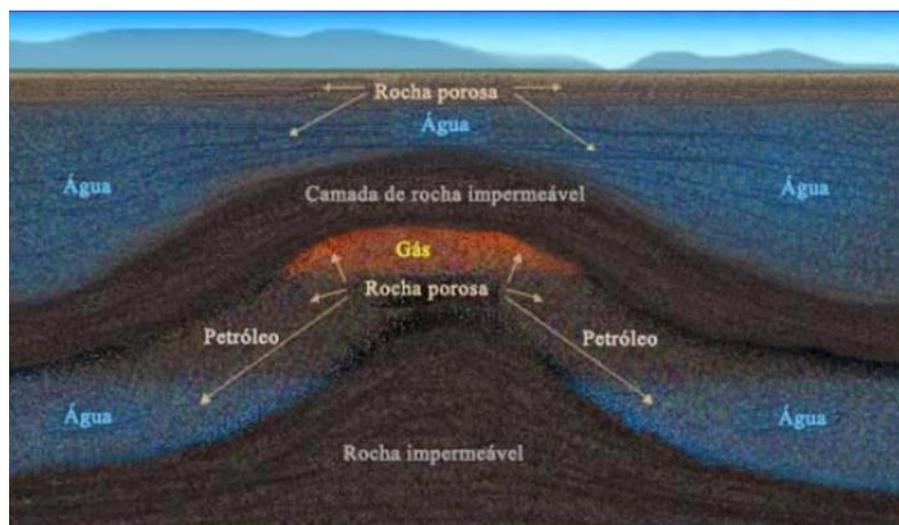
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Geologia das Rochas Reservatório

Em geologia uma rocha reservatório provém de bacias sedimentares, originadas pela deposição de detritos de outras rochas, geralmente transporta agentes tais como, água e ar, elas são classificadas, em geral, como porosas (BUCHELI, 2005).

De maneira simplificada pode-se dizer que a rocha reservatório pode ser vista como um material sólido, poroso e geralmente preenchido por algum tipo de fluido como água, óleo ou gás (BUCHELI, 2005), conforme mostrado na Figura 1.

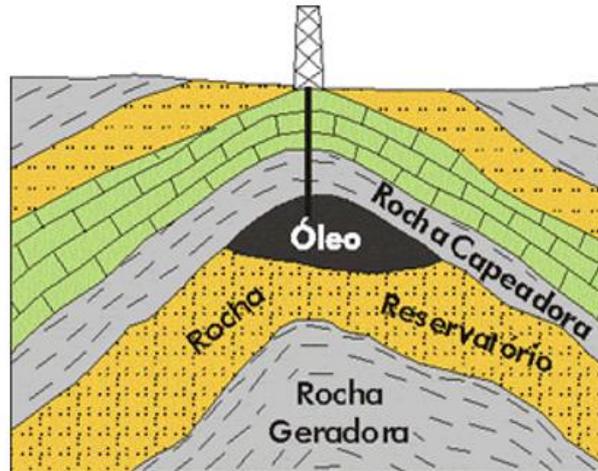
**Figura 1** – Reservatório típico de petróleo e gás



Fonte: BITTENCOURT (2012)

A qualidade da rocha reservatório está associada à presença de hidrocarbonetos nos fluídos que podem ser estimados pela física das rochas (Petrofísica), grande parte disso está relacionada com a rocha-mãe, rocha selante e a capacidade do reservatório de conter hidrocarbonetos, como ilustrado na Figura 2 (AMINZADEH e DASGUPTA, 2015).

**Figura 2 - Localização da rocha reservatório**



Fonte: modificada de TEIXEIRA (2009)

As rochas reservatório de petróleo e gás são porosas e permeáveis. Elas contêm passagens interconectadas de poros ou furos microscópicos que ocupam as áreas entre os grãos de minerais da rocha (Figura 3). O petróleo e o gás natural são produzidos a partir da decomposição de microorganismos, acumulados em rochas porosas e permeáveis (reservatórios) na vasta extensão do tempo geológico (AMINZADEH e DASGUPTA, 2015).

**Figura 3 - Fotomicrografia da rocha reservatório mostrando a porosidade e os poros conectados**



Fonte: AMINZADEH e DASGUPTA (2015)

O estudo das propriedades físicas das rochas constitui-se um fator decisivo para análise do comportamento em reservatório de petróleo. Portanto, a caracterização desse comportamento é de grande interesse para a indústria de petróleo (ROSA *et al.*, 2006).

Durante a fase de caracterização do reservatório comumente são extraídas amostras da rocha reservatório e nelas são realizados diversos ensaios para a determinação de propriedades, como se pode observar na Figura 4.

**Figura 4 - Extração de testemunhos de uma rocha reservatório**



Fonte: SINMEC (2003)

Dentre as pesquisas sobre rocha reservatório, pode-se destacar o trabalho de GEET *et al.* (2001) analisou quantitativamente rochas reservatórios utilizando microtomografia computadorizada e afirmou que essa técnica é importante, além de ser não destrutiva, obtendo assim a medida da porosidade e mineralogia da rocha em estudo.

Em aplicações geológicas, CARLSON e KETCHAN (2001) abordaram uma compreensão explorando as noções de tomografia e microtomografia de raios X, como digitalização, instrumentação e métodos que podem ser utilizados na adequação de dados da tomografia juntamente com as descrições de várias aplicações geológicas.

FERNANDES *et al.* (2009) determinaram parâmetros microestruturais em rochas utilizando a técnica de microtomografia. Esta metodologia usada possibilitou a caracterização detalhada de propriedades petrofísicas como a porosidade e a distribuição de tamanho dos poros, sendo de grande importância para a indústria petrolífera.

OLIVEIRA (2012) desenvolveu uma metodologia para análise do sistema poroso de poços em reservatório a partir das variações do coeficiente de atenuação do material geológico, utilizando a técnica tomográfica por transmissão de raio x, mostrando que a TC é aplicável na determinação da porosidade.

## 2.2 Porosidade

Em relação a porosidade de rochas reservatórios, a maioria dos depósitos comerciais de petróleo ocorre em reservatórios formados por rochas sedimentares principalmente em

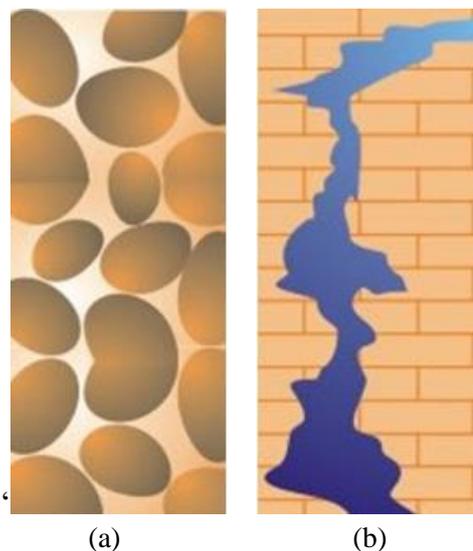
arenitos e calcários. Entretanto, vários outros tipos de rocha podem apresentar porosidade suficiente para serem localmente importantes como reservatórios. (THOMAS, 2004)

Porosidade é uma propriedade volumétrica fundamental de uma rocha reservatório que descreve o volume de armazenamento potencial de fluidos (isto é, água petróleo ou gás), representada pela letra grega  $\phi$ , sendo definida como a proporção do volume do espaço vazio para o volume total, sendo uma quantidade adimensional, geralmente expressa em porcentagens (SCHON, 2015).

Ainda segundo SCHON (2015), os poros são formados pelos resultados dos processos geológicos, físicos e químicos e são gerados durante a gênese da rocha, onde recebem a denominação de primária e/ou durante a história geológica da rocha onde são identificadas como porosidade secundária.

A porosidade primária é gerada juntamente com os sedimentos ou rochas pelos espaços entre os grãos (porosidade intragranular). Nos materiais sedimentares, o tamanho, a forma das partículas e a presença de cimentação influenciam a porosidade. Já a secundária, por sua vez, desenvolve-se após a formação das rochas ígneas metamórficas ou sedimentares, por fraturamento ou falhamento durante sua formação (porosidade de fraturas) (PEIXOTO, 2014), conforme ilustrado na Figura 5.

**Figura 5 – Processo geológicos (a) porosidade primária e (b) porosidade secundária**



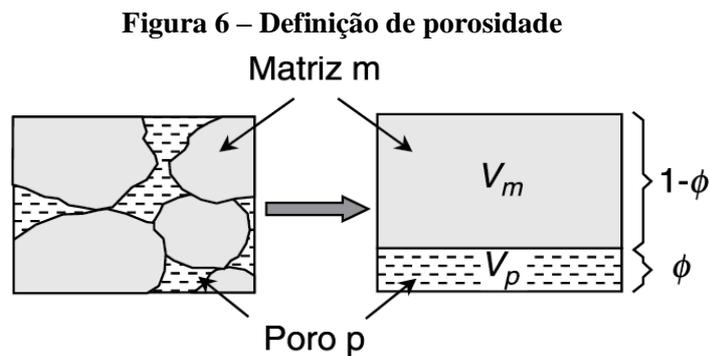
Fonte: Adaptado de PEIXOTO (2014)

A quantidade, tamanho, geometria e o grau de conectividade dos poros controlam diretamente a produtividade do reservatório. No entanto, para determinar a porosidade, devem ser conhecidas para os tipos de medições, como citada abaixo:

- **Medições Diretas** (laboratório), baseadas na determinação do volume sólido, expansão de gás ou técnicas de deslocamento.
- **Medições Indiretas** (método de perfilagem e radiação), baseadas na correlação entre as propriedades e porosidade, como densidade, resposta de nêutrons e velocidade da onda sísmica.

Medida diretamente, em amostras de testemunho, ou indiretamente, a porosidade de uma rocha pode ser classificada como insignificante (0-5%), pobre (5-10%), regular (10-15%), boa (15-20%) ou muito boa (>20%) (OLIVEIRA, 2017).

Assim a porosidade pode ser definida como o volume resumido de todos os poros, fraturas, etc. De modo generalizado, de todo fluido ou “não sólido” contendo partes de uma amostra relacionada com o volume total da amostra na Figura 6 (SCHON, 2015).



Fonte: SCHON (2015)

Podendo ser representada através da Equação 1 (SCHON, 2015).

$$\phi = \left( \frac{v_p}{v_t} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

em que,  $\phi$  é a porosidade,  $v_p$  é o volume da parte porosa e  $v_t$  é o volume total da amostra.

A definição acima descreve a “porosidade total”. Se a rocha contém uma parte de poros não conectados ou separados, essa parte não contribui para nenhum transporte de fluidos dentro da rocha e é “não efetiva”. Logo a porosidade efetiva ou interconectada é a relação entre o volume poroso conectado e o volume total da rocha (SCHON, 2015).

Para a descrição de reservatório é importante fazer a distinção entre:

- Porosidade total ou fração de volume total ocupada pelo espaço poroso total.
- Porosidade efetiva ou fração do volume total ocupada pelos seus poros interligados.

AMYX *et al.* (1960) definem a porosidade total com “... a relação entre o espaço poroso total da rocha com o seu volume total, a porosidade efetiva é a razão entre o espaço vazio interconectado na rocha e o volume total da rocha”.

As medições da porosidade de um material são geralmente realizadas por métodos convencionais. No entanto, o método de raios gama é mais preciso, rápido e não destrutivo. Permite a determinação da porosidade em escala milimétrica (ou menor) sem interferir na integridade física da amostra (POTTKER e APPOLONI, 2000).

O método de transmissão de raios gama para estudo da porosidade em laboratório, foi introduzido por PHOGAT e AYLMOORE (1989). Essa técnica também foi aplicada e avaliada na medida da porosidade em rochas de reservatório por BODWADKAR e REIS (1994). Mas recentemente OLIVEIRA (2012) desenvolveu uma metodologia que analisou o sistema poroso em rochas reservatório utilizando a microtomografia.

POTTKER e APPOLONI (2000) demonstram a medida da porosidade em amostras de solo, rochas arenito e cerâmica, utilizando a transmissão gama e concluíram que com esta técnica é possível determinar de forma detalhada a porosidade total de maneira não destrutiva, oferecendo vantagens quando comparadas com metodologia convencionais.

No trabalho de ROCHA *et al.* (2005), foram utilizadas as técnicas de transmissão gama e microtomografia para avaliar a porosidade da distribuição do tamanho dos poros de espumas de cerâmicas de SiC. Concluindo que as duas técnicas utilizadas se mostraram boas ferramentas na quantificação não destrutiva da porosidade das amostras consideradas.

MOREIRA e APPOLONI (2009) aplicaram a mesma técnica de transmissão de raios gama com  $\text{Am}^{241}$ , para identificar a porosidade total em cerâmica de Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e de Carbetto de Boro ( $\text{B}_4\text{C}$ ), mostrando que os resultados dos valores médios da porosidade determinados pela técnica gama foram os mesmos fornecidos pelo fabricante. Assim como no trabalho de SAADIAND e SAADAN (2011), que também utilizou a análise gama, porém com o  $\text{Cs}^{137}$ , para determinar a porosidade em Alumina dopada, sendo comparada com o método convencional (Arquimedes), concluindo que a técnica gama é mais precisa, rápida e não destrutível.

BORGES e PIRES (2012) apresentaram uma análise dos métodos propostos para medir a porosidade do solo por meio da técnica de atenuação de raios gama, sendo a

porosidade obtida através de avaliações realizadas no coeficiente de atenuação em massa, determinado experimentalmente e teoricamente (XCOM). Seus resultados constataram uma melhor correlação da porosidade por atenuação do que pelo método tradicional.

## 2.3 Testes Não Destrutivos

Os Testes Não Destrutivos (TND) são definidos como testes capazes de proporcionar informações a respeito do teor de defeitos de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, equipamentos e estruturas sem danificá-los. E estão entre as principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos que são amplamente utilizados nos setores de petróleo/petroquímico, químico, entre outros (ABENDI, 2013).

Os TND são muito utilizados em métodos tomográficos, sendo iniciado por SWEENEY (1974), em seu trabalho relatou estudos em diversos materiais da área industrial (plástico, cerâmica, madeira, etc.) com diferentes tipos de radiação: raios X, gama e fontes de nêutrons.

No Brasil várias pesquisas relacionadas ao TND por tomografia, tomou pulso após tomógrafos serem construídos nas próprias instituições de pesquisa, como é o caso do trabalho de LOPES (1988), que construiu um tomógrafo com fonte de raios gama, sugerindo diversas aplicações em TND.

SHINOHARA *et al.* (2002) mostrou resultados com TND em tubulações com corrosões, furos e isoladores de alta tensão danificados por vandalismo, utilizando a tomografia de raios gama na realização de ensaios radiográficos, que permitiram concluir a potencialidade e viabilidade do uso da técnica tomográfica.

Em BATISTA *et al.* (2003) relataram sobre a performance do sistema tomográfico com fonte de raios gama, para ser utilizado em TND na análise de objetos metálicos de baixa densidade e pesquisas de amostras biológicas, concluindo que o sistema tomográfico pode servir de instrumento para investigação ou mesmo auxiliar na conclusão de outros trabalhos.

Esses TND também foram aplicados na detecção de defeito na solda em tubos de aço por meio da tomografia gama, como visto nos trabalhos de MOURA *et al.* (2015) e OLIVEIRA *et al.* (2016).

## 2.4 Tomografia Computadorizada

A Tomografia Computadorizada (TC) para aplicações não-médicas tornou-se algo significativo na realização de pesquisas em TND, pois é um método eficiente na observação de detalhes nas estruturas internas de corpos ou objetos, sem a necessidade de abri-los e destruí-los. O objetivo da utilização dessa técnica é a viabilização de verificação de anormalidades interiores, mensuração e possibilidade de constatação de diferentes constituintes (SILVA, 2000).

Pesquisas são realizadas no Brasil com tomógrafos desenvolvidos especialmente para aplicações em Ciência do Solo que envolvem estudos sobre a distribuição da densidade aparente e mudanças de porosidade na estrutura dos solos.

VAZ *et al.* (1989) utilizando um tomógrafo de raios gama de resolução milimétrica, avaliaram a compactação do solo durante práticas de manejo convencionais através de análises de TC na densidade aparente do solo.

CRESTANA *et al.* (1996) testaram a viabilidade de um minitomógrafo projetado exclusivamente para pesquisa, este equipamento testado mostrou ser útil na medição da densidade aparente do solo, além de vantagens que permitem a escolha dos feixes de radiação sendo importante na análise dos meios porosos. Mais tarde, VAZ *et al.* (1998) sugeriram que a TC pôde ser uma ferramenta importante e interessante para estudos de estruturas porosa e não invasiva em tais casos.

Dessa maneira, a TC vem sendo alvo de pesquisas como é o caso em PIRES *et al.* (2010) que realizaram uma revisão de literatura sobre as pesquisas desenvolvidas por cientistas brasileiros e publicadas em revistas nacionais e internacionais. Uma grande quantidade de trabalhos foi abordada por esses autores, enfatizando a contribuição brasileira.

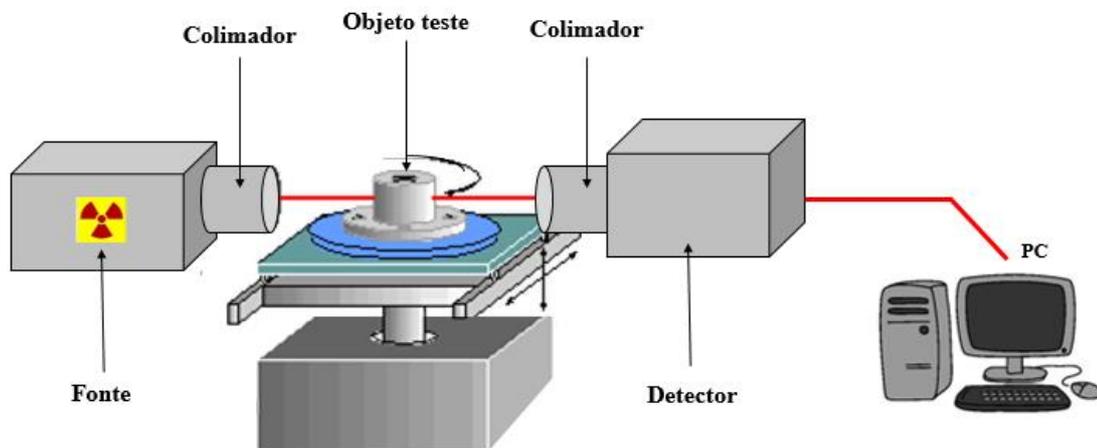
Baseado nessas pesquisas, é possível utilizar sistemas tomográficos de pequeno porte com configuração de primeira geração para fins de utilização em TND de pequenos objetos ou amostras. Esses sistemas tomográficos permitem analisar a atenuação sofrida por um feixe de radiação que atravessa um objeto que é captado pelo detector que gera sinais que são registrados e processados em um sistema operacional. As principais partes de um sistema tomográfico de primeira geração são:

- Fonte emissora de radiação;
- Detectores de radiação (geralmente posicionados após colimadores e no plano da seção transversal irradiada);

- Unidade de posicionamento do objeto a ser inspecionado (geralmente uma base giratória);
- Sistema de processamento computadorizado que controla a aquisição, o processamento e a análise da informação coletada (computador e pacotes de programas dedicados).

Os sistemas tomográficos de primeira geração apresentam um arranjo fonte-detector fixo e movimentos de rotação e translação da amostra. Para cada direção de varredura são feitas várias translações em intervalos iguais, conhecidos como passos lineares. Para cada uma dessas translações são contabilizados os fótons que atravessam a amostra durante um tempo de contagem pré-determinado. Ao final de cada varredura completa (conjunto de passos lineares), o equipamento retorna à sua posição inicial de translação (BORGES, 2012). Como é observado na Figura 7.

**Figura 7 - Sistema tomográfico de primeira geração**



Fonte: Adaptado de ANDREAS (2015)

O feixe de radiação ao interagir com as diferentes densidades do material interno da amostra, atinge o detector gerando sinais que são registrados e em seguida processados em um sistema computacional (TETZNER, 2008).

Para as pesquisas em física dos solos, geralmente são utilizadas fontes de  $^{137}\text{Cs}$  com energia média de 661,6 keV e  $^{241}\text{Am}$  com energia de 59,5 keV com feixes colimados de radiação (FERRAZ e MANSELL, 1979)

## 2.5 Método de Transmissão da Radiação

A técnica de atenuação de radiação gama monoenergética para determinação das propriedades físicas de uma rocha não é recente. A sua utilização para a análise da densidade ou porosidade é bastante explorada devido ao seu caráter não destrutivo, o que proporciona vantagens em relação aos métodos tradicionais usados.

VOMOCIL (1954) foi o pioneiro ao utilizar a técnica gama para analisar a densidade em solos. Desde então, VAN BAVEL em 1959, também, usou a técnica com uma fonte  $^{137}\text{Cs}$  para avaliar aspectos relacionados a taxa de contagem com a distância entre a fonte e o detector, bem como o efeito da densidade do material nas taxas de contagem.

Entre os anos de 1960 a 1962, GURR, FERGUSON e GADNER escolheram a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , devido a sua alta energia primária dos fótons (661,6 keV) e à longa meia-vida, investigaram os feixes colimados da radiação gama. Assim para a determinação das propriedades físicas em Ciência do solo, é comumente utilizada a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  (661,6 keV), o que advém de vários fatores, como o espectro apresenta uma boa distinção do pico de energia.

### 2.5.1 Atenuação dos Raios Gama

No processo de interação da radiação com a matéria, os fótons podem ser completamente absorvidos do feixe incidente ou espalhados em alguma direção. (SIEGBAHN, 1979). O feixe monoenergético pode ser obtido através de uma fonte de radiação gama, como usado nos trabalhos de ALAM (2001), AKAR (2006), EKINGIR (2007) e DEMIR (2009).

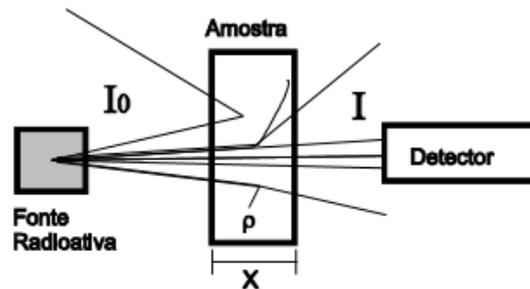
O processo de remoção dos fótons (espalhados ou absorvidos) segue uma lei exponencial, sendo que o número de fótons removido do feixe incidente, por uma camada de material absorvedor com uma determinada espessura, é proporcional a essa espessura e ao número de fótons incidente. Tal fato é descrito pela lei de atenuação de Lambert-Beer (KAPLAN, 1978). Como mostrado na Equação 2.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (2)$$

em que o  $x$  corresponde à espessura do material absorvedor em  $cm$  e  $\mu$  o coeficiente de atenuação linear e sua unidade no Sistema Internacional de Unidades, isto é, no SI é  $cm^{-1}$ . A intensidade  $I$  ( $cps$ ) do feixe emergente está relacionada à intensidade  $I_0$  ( $cps$ ) do feixe incidente pela lei de Lambert-Beer que descreve tal atenuação.

Portanto, um feixe de raios gama monoenergético incidindo sobre um material de espessura  $x$  e densidade  $\rho$ , está mostrado na Figura 8. Parte da radiação incidente é espalhada, parte é absorvida, e uma fração atravessa o material sem interagir. A intensidade  $I$  do feixe emergente está relacionada à intensidade  $I_0$  do feixe incidente.

**Figura 8 - Esquema mostrando a atenuação de um feixe de raios gama incidente em uma amostra de densidade  $\rho$  e espessura  $x$**



Fonte: Oliveira (2009)

Ou seja, como o coeficiente de atenuação linear é limitado pelo fato de variar com a densidade do material absorvedor, mesmo que seja sempre com o mesmo material. Por esse motivo se define o coeficiente de atenuação de massa, que representa a densidade do material absorvedor, a partir da Lei de Lambert-Beer é possível obter a Equação 3.

$$I = I_0 \cdot e^{-\rho \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot x} \quad (3)$$

Em que  $\mu$  é o coeficiente linear ( $cm^{-1}$ ) e  $\rho$  é a densidade do material absorvedor ( $g/cm^3$ ). O coeficiente de atenuação de massa  $\mu_m$  que está relacionado com o coeficiente de atenuação linear, através da relação  $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$ , em  $cm^2/g$ .

Neste contexto, FERRAZ e MANSELL (1979) apresentaram que o coeficiente de atenuação de massa para um material está diretamente relacionado à composição química

desse material. Com isso, esse coeficiente de atenuação de massa pode ser determinado teoricamente usando o programa NIST XCOM (2015).

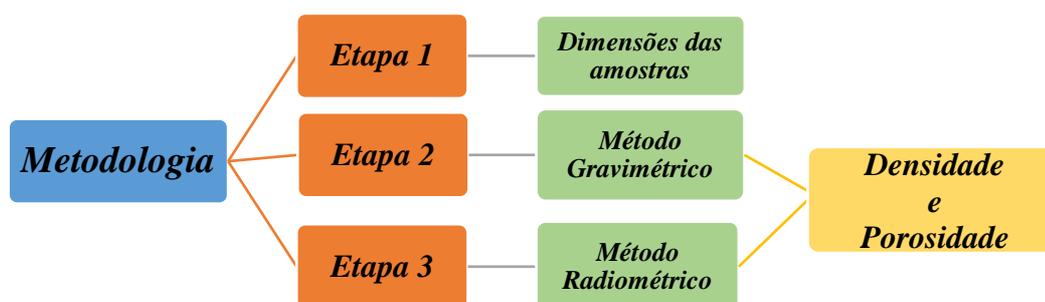
O NIST XCOM é um banco de dados disponível na web e uma boa ferramenta para a determinação do coeficiente de atenuação de materiais compostos, misturas ou substâncias. Introduzindo a composição química da amostra na interface de entrada do XCOM, é fornecido uma tabela de dados de acordo com a energia e o coeficiente de atenuação, além da contribuição de cada processo de interação no valor total de  $\mu$ . O programa permite o cálculo do coeficiente de atenuação de massa em uma energia específica (HUBBEL e BERGER, 1987).

Assim como no trabalho de FONSECA (2017), que também utilizou a tomografia gama com fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e obteve dados em amostras de solo tropicais simulados com minerais, cujo coeficiente de atenuação foi informado pelo programa XCOM. O resultado serviu de referência para comparar com seus dados experimentais, concluindo que a tomografia gama é muito eficiente na análise do coeficiente de atenuação quando em relação aos valores teóricos do XCOM.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado a metodologia deste trabalho que foi dividida em 3 etapas. A primeira realizada para mensurar a massa, diâmetro e altura com auxílio de instrumentos como balança e paquímetro. A segunda etapa é definida a densidade e porosidade das amostras em estudo através do método gravimétrico. Por fim a terceira etapa que prioriza a coleta dos dados experimentais pela transmissão de raios gama, para analisar o coeficiente de atenuação e comparar com a referência calculada disponível no banco de dados NIST XCOM (2015), a fim de obter a densidade e porosidade pelo método radiométrico, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Ilustração do esquema da metodologia utilizada neste trabalho



Fonte: Autoria própria

#### 3.1 Dimensões

As amostras foram pesadas e medidas, tendo suas dimensões externas de altura e diâmetro mensuradas, com o intuito de determinar volume e densidade. Os instrumentos utilizados na pesagem e medição estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Instrumentos utilizados nesse estudo

Instrumento	Marca	Modelo	Especificações Técnicas
Balança Analítica	Shimadzu	AUY - 220	Precisão: 0,0001g Linearidade: $\pm 0,0002g$ Repetitividade: $\leq 0,0001g$
Paquímetro Digital	Mitutoyo	Digimatic - MyCAL	Exatidão: $\pm 0,02mm$ Repetitividade: 0,01mm

Fonte: Autoria própria

Para a medição da altura e diâmetro médio de cada amostra, fez-se cinco medidas com o paquímetro posicionado em diferentes posições. E as pesagens foram realizadas cinco medidas de cada amostra, para obter boa reprodutibilidade, a fim de atender às incertezas de medição. A Figura 10, mostra os instrumentos usados para a pesagem e medição das amostras.

**Figura 10 - Instrumentos utilizados nas medições**



(a) Balança Analítica



(b) Paquímetro Digital

Fonte: Autoria própria

### 3.1.1 Os Erros de Medição

Para estabelecer a estimativa de incerteza de medição foi necessário identificar as variáveis que contribuem para incerteza e seus valores. Nas medidas diretas das dimensões da massa, altura e diâmetro, vários fatores afetam as medições realizadas que contribuem para o cálculo das incertezas associadas aos valores medidos, como é o caso das variações obtidas na repetição de uma mesma medida, seja ela efetuada pelo operador ou por vários erros sistemáticos que afetam. Além disso podemos citar diversas fontes que contribuem para a estimativa da incerteza como as medidas experimentais, estabilidade, linearidade, exatidão e resolução da balança e do paquímetro.

Neste experimento serão analisadas e estimadas estas incertezas, classificadas entre incertezas do tipo A (estatísticas) e do tipo B (não estatísticas) que serão utilizadas para o cálculo da incerteza combinada de cada medida.

Uma vez identificadas as fontes de incerteza (tipo A ou B) e consideradas as suas contribuições pode-se estimar a incerteza padrão combinada ( $u_c$ ). A fim de que as incertezas sejam combinadas, deve-se calcular a incerteza padrão de cada contribuição que consiste na razão do valor obtido da incerteza padrão pelo valor da variável, como observado na Equação 11.

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (11)$$

em que  $u(x_i)$  é a incerteza padrão associada com a grandeza de entrada  $x_i$  e  $n$  é o número de medidas.

Os efeitos da ação combinada das várias fontes de incerteza devem ser quantificados pela incerteza combinada. E neste experimento as fontes de incerteza são independentes, que se traduz em dizer que elas não estão correlacionadas. A expressão para se determinar esta incerteza combinada não correlacionada é expressa na Equação 12.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^x c_i^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^x u_i^2(y)} \quad (12)$$

em que  $u_c$  é a incerteza combinada,  $c$  é o coeficiente de sensibilidade, tal incerteza representa uma faixa de dispersão equivalente a um desvio padrão, avaliado ao redor do resultado de medição.

E neste estudo foi determinado o coeficiente de sensibilidade para a densidade, volume e porosidade conforme as Equações 13, 14 e 15, respectivamente.

$$c_\rho = \sqrt{\left(\frac{1}{v} \cdot u_m\right)^2 + \left(\frac{-m}{v^2} \cdot u_v\right)^2} \quad (13)$$

$$c_v = \sqrt{\left(\frac{\pi dh}{2} \cdot u_d\right)^2 + \left(\frac{\pi d^2}{4} \cdot u_h\right)^2} \quad (14)$$

$$c_{\phi} = \sqrt{\left(\frac{u_{v_p}}{v_p}\right)^2 + \left(\frac{u_{v_t}}{v_t}\right)^2} \quad (15)$$

Neste caso espera-se que este intervalo englobe uma grande porção da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurado e então é denominada de incerteza expandida ( $U$ ) e é obtida quando a incerteza padrão combinada é multiplicada por uma constante  $k$  que é definido para probabilidade de abrangência para 95%. Portanto a incerteza expandida depende do nível de confiança e o resultado de medição é expresso por  $y \pm U$ , onde o  $y$  corresponde ao mensurado. A incerteza expandida é calculada com base na incerteza combinada a partir da Equação 16:

$$U = u_c \cdot k \quad (16)$$

em que  $u_c$  é a incerteza combinada e  $k$  é a constante para o nível de confiança de 95%. Através do valor do grau de liberdade e da tabela de  $t$ -student encontra-se o fator de abrangência correspondente.

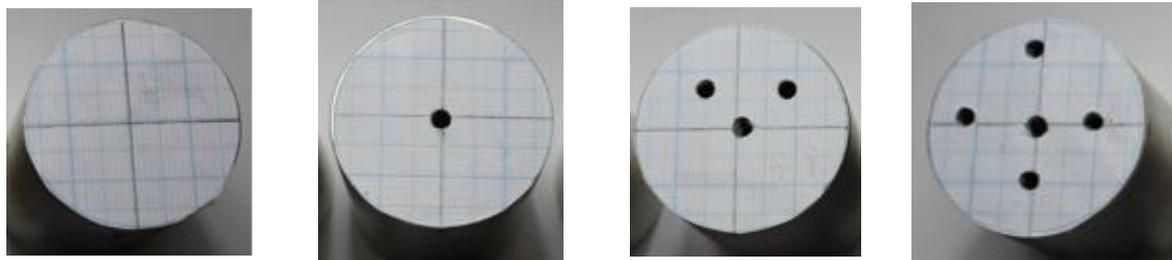
### 3.2 Descrição das amostras

Para investigar as características físicas como densidade e porosidade em material geológico, considerando que não existe valores de referência para seus coeficientes de atenuação, surgiu a proposta de confeccionar *phantoms* físicos com materiais de *Alumínio (Al)* e o *Policloreto de Vinila (PVC)*.

Estes materiais que possuem propriedades conhecidas e próximas às amostras geológicas em estudo, já que foram criados com o objetivo de simular o gradiente de porosidade, de forma a obter parâmetros comparativos, tendo em vista que possuem referências nos valores de coeficiente de atenuação mássico, através do banco de dados no NIST XCOM (National Institute of Standards and Technology).

Foram utilizados quatro *phantoms* cilíndricos com material de *Al* e *PVC* sendo um homogêneo, um simétrico e dois assimétricos. Os *phantoms* homogêneos são compostos pelo

material maciço de *Al* e *PVC* conhecido (Figura 11 (a)), os *phantoms* simétricos possuem um



(a) Homogêneo (b) Simétrico (c) Assimétrico (d) Assimétrico  
furo central em seu interior, assim como os *phantoms* assimétricos com furos de mesmo diâmetro distribuídos radialmente, conforme observado na Figura 11.

**Figura 11 – Vista superior dos *phantoms* - *Al* e *PVC***

Fonte: Autoria própria

Os *phantoms* com furos representados na Figura 11 (b), (c) e (d) simulam um gradiente de porosidade condicionado nessas amostras, com objetivo de se criar uma metodologia padrão para a observação do comportamento da atenuação nos espaços vazios, tendo como finalidade comparar as variações de porosidade e densidade nas rochas em estudo. Assim a Figura 12 mostra a quantidade de amostras utilizadas nesse trabalho.

**Figura 12 – Diagrama da quantidade de amostras em estudo**



Fonte: Autoria própria

A fim de diferenciar os objetos em estudo, os três testemunhos geológicos de formato cilíndrico e tamanhos variados foram identificados conforme a imagem observada na Figura 13.

**Figura 13 - Vista frontal dos três testemunhos geológicos**



Fonte: Autoria própria

Estes três testemunhos são rochas reservatórios, cujo diâmetro, altura e massa estão mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Medidas dos testemunhos de rocha reservatório**

Amostras	Massa (g)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)
<i>A</i>	112,0548 ± 0,0019	3,5540 ± 0,0001	4,9248 ± 0,0014
<i>B</i>	153,8413 ± 0,0032	3,5324 ± 0,0003	5,9724 ± 0,0020
<i>C</i>	146,0418 ± 0,0021	3,5470 ± 0,0002	6,5140 ± 0,0003

Fonte: Autoria própria

Os *phantoms* de *Al* e *PVC* foram confeccionados conforme as dimensões dos testemunhos, diferenciando apenas pela variação de porosidade, simulada para uma melhor comparação e interpretação dos resultados, assim identificado na Figura 14 e 15.

**Figura 14 – Vista frontal dos *phantoms***

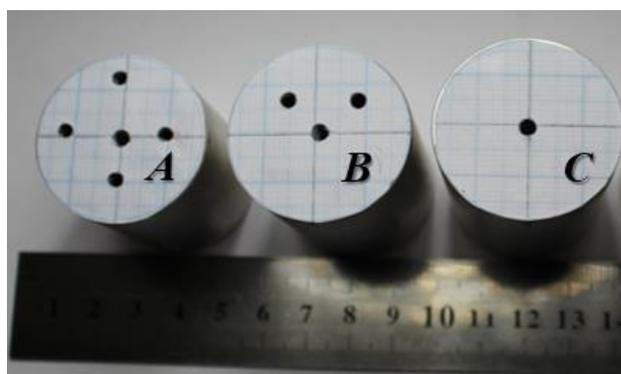


(a) Padrão – Sem furo

(b) Com furos

Fonte: Autoria própria

**Figura 15 - Vista superior dos *phantoms***



Fonte: Autoria própria

Esses furos foram distribuídos radialmente cujo diâmetro de  $0,3146 \pm 0,0011\text{cm}$  foi o mesmo em todos os furos e seu comprimento correspondeu a altura do *phantom*, sendo observado na Tabela 3.

**Tabela 3 - Medidas dos *phantoms***

Amostras	Furos	Massa (g)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	
<i>Phantom</i>	<i>P</i>	0	$159,0397 \pm 0,0019$	$3,5416 \pm 0,0010$	$5,9618 \pm 0,0012$
<i>Al</i>	<i>A</i>	5	$125,8255 \pm 0,0014$	$3,5406 \pm 0,0009$	$4,9322 \pm 0,0002$
	<i>B</i>	3	$155,2636 \pm 0,0021$	$3,5436 \pm 0,0005$	$5,9792 \pm 0,0011$
	<i>C</i>	1	$171,9779 \pm 0,0022$	$3,5514 \pm 0,0003$	$6,4698 \pm 0,0001$
<i>Phantom</i>	<i>P</i>	0	$90,4850 \pm 0,0031$	$3,5420 \pm 0,0002$	$5,9724 \pm 0,0001$
<i>PVC</i>	<i>A</i>	5	$71,3732 \pm 0,0011$	$3,5370 \pm 0,0011$	$4,9322 \pm 0,0010$
	<i>B</i>	3	$88,1242 \pm 0,0034$	$3,5424 \pm 0,0003$	$5,9662 \pm 0,0021$
	<i>C</i>	1	$97,7511 \pm 0,0023$	$3,5450 \pm 0,0002$	$6,5050 \pm 0,0003$

Fonte: Autoria própria

### 3.3 Método Gravimétrico

#### 3.3.1 Determinação do Volume

Na realização do método convencional ou gravimétrico para determinar a densidade das amostras, é necessário que se conheça o volume da parte sólida e dos poros, a fim de obter o volume total das amostras em estudo.

No que diz respeito a geometria cilíndrica das amostras, foi calculado o volume através da Equação 4.

$$v_t = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4} \quad (4)$$

em que:  $v_t$  é o volume do cilindro ( $cm^3$ ),  $d$  é o diâmetro do cilindro ( $cm$ ) e  $h$  refere-se à altura ( $cm$ ).

Para os *phantoms* físicos *Al* e *PVC*, além das medições da altura e diâmetro ao longo da amostra, foi mensurado também o diâmetro do furo para obter o volume do poro, levando em consideração a quantidade de furos em cada amostra, como expressa na Equação 5.

$$v_p = p \cdot \frac{\pi \cdot d_p^2 \cdot h}{4} \quad (5)$$

em que  $v_p$  é o volume do poro ( $cm^3$ ),  $p$  se refere a quantidade de furos (poros) em cada amostra simulada,  $d_p$  é o diâmetro do poro ( $cm$ ) e  $h$  corresponde a altura ( $cm$ ).

Através das Equações 4 e 5, é possível estabelecer o volume da parte sólida para cada amostra como:

$$V_s = V_t - V_p \quad (6)$$

sendo  $v_s$  o volume da parte sólida da amostra ( $cm^3$ ).

### 3.3.2 Determinação da Densidade Aparente ( $\rho_{ap}$ )

Relacionando os componentes massa e volume, a maneira mais prática de se determinar, com precisão razoável, a densidade aparente, é por meio do método gravimétrico, onde considera o peso específico da amostra e seu volume total, incluindo o espaço vazio que a compõem. A densidade aparente pode ser calculada por meio da Equação 7.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v_t} \quad (7)$$

em que  $\rho_{ap}$  é a densidade aparente ( $g/cm^3$ ), onde  $m$  é a massa da amostra ( $g$ ) e  $v_t$  é o volume total da amostra ( $cm^3$ ).

### 3.3.3 Determinação da Densidade do Meio Material ( $\rho_m$ )

De acordo com as informações coletadas na Equação 7, fica possível calcular a densidade específica do material em estudo, utilizando a Equação 8.

$$\rho_m = \frac{m}{v_s} \quad (8)$$

em que  $\rho_m$  é a densidade do meio material ( $g/cm^3$ ),  $m$  é a massa da amostra ( $g$ ) e  $v_s$  é o volume da parte sólida em estudo ( $cm^3$ ).

Por convenção, a medição dos espaços vazios presentes entre os grãos que compõe os materiais rochosos é definida como sendo a “porosidade da rocha”. O conhecimento desta propriedade é fundamental antes que as questões relacionadas ao tipo de fluido, à quantidade do fluido e a recuperação estimada do fluido possam ser respondidas.

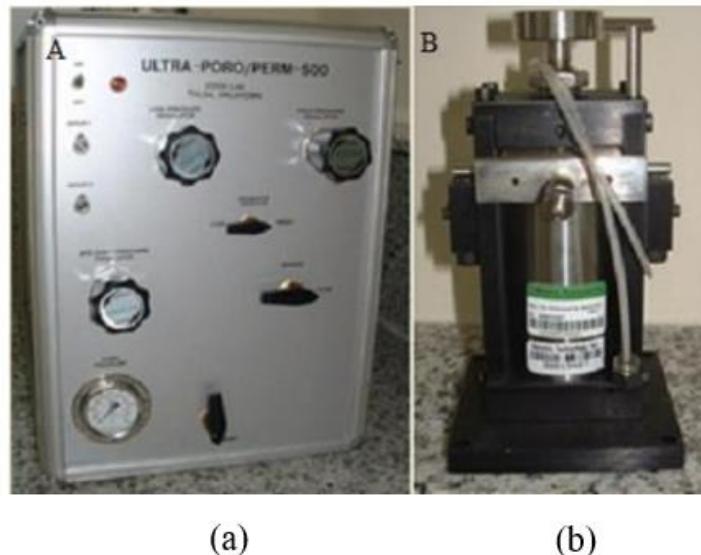
### 3.3.4 Determinação da Porosidade ( $\phi$ )

A porosidade pode ser determinada pelos métodos diretos e indiretos. De maneira direta, por análise em laboratório, podendo também ser incluída, por porcentagem de pontos pela injeção de gás, como também através do método indireto por testemunhos ensaiados com tomografia computadorizada. E, portanto, para estimar a porosidade três parâmetros são necessários para as medidas em laboratório como o volume total, volume de sólidos e volume de poros. Sendo definida e calculada conforme a Equação 1, como visto na Seção 2.2.

A princípio nos testemunhos de rocha dessa pesquisa, foram feitos ensaios laboratoriais para análise da porosidade, utilizando o método convencional de porosimetria por expansão

gasosa. Essas amostras foram submetidas a uma secagem por 24 horas sob temperatura de 105°C em uma estufa, em seguida, efetivou-se a porosimetria usando o equipamento ULTRA-PORO/PERM 500 fabricado pela CORE LAB INSTRUMENTS com auxílio de um copo matriz (Figura 16), realizado no Laboratório de Petrofísica da Universidade Federal de Campina Grande/ PB.

**Figura 16 - Equipamento utilizado na porosimetria (a) UltraPoroPerm 500, (b) Copo matriz**



Fonte: (Ribeiro, 2014)

Este copo matriz mede o volume de grãos sólidos da amostra. A diferença entre o volume de grãos e o volume total da amostra, consiste no seu volume de vazios (poros).

Para realizar o cálculo da porosidade, faz-se necessário conhecer o valor do volume de vazios. Para tal emprega-se a Lei de Boyle (Equação 9).

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (9)$$

em que  $P$ ,  $V$  e  $T$  são pressão, volume e temperatura, respectivamente, e o subscrito 1 e 2, representam as condições iniciais e de expansão do gás, respectivamente.

O volume de grãos é medido pela expansão do Nitrogênio contido em uma câmara no interior do porosímetro. Nesta câmara, de volume conhecido  $V_1$ , mede-se a pressão  $P_1$  na qual o gás encontra-se comprimido. Em seguida, permite-se que o gás se expanda através de uma

conexão ao copo matriz, de volume  $V_2$ , também conhecido, o qual contém o plugue. Após a estabilização da expansão do gás, mede-se a pressão  $P_2$ . A queda de pressão dada pela diferença  $P_1-P_2$  é proporcional ao volume  $V$  ocupado pelo gás (Equação 10).

$$V = V_1 + V_2 - V_g \quad (10)$$

em que,  $V$  é volume ocupado pelo gás e  $V_g$  é o volume de grãos da amostra.

### 3.4 Arranjo Experimental

#### 3.4.1 Tomografia Gama

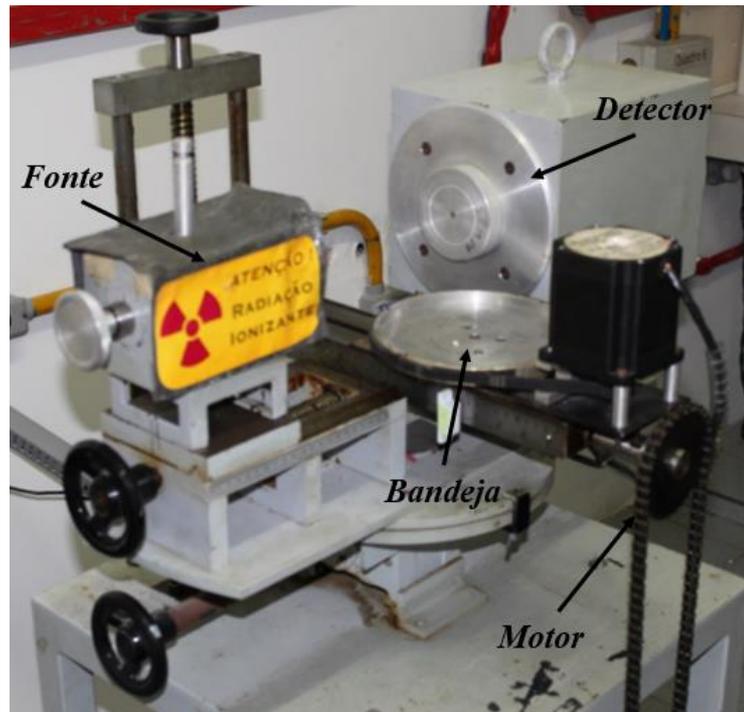
O tomógrafo utilizado no experimento pertence ao grupo de Tomografia Gama e Fluidodinâmica, do Laboratório Prof. Dr. Cornelius Keller do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), que foi construído obedecendo aos critérios de avaliação para tomografia industrial, onde a resolução espacial e temporal e o contraste do tomógrafo foram avaliados e dados como satisfatórios como visto no trabalho DANTAS *et al.* (2008).

#### 3.4.2 Tomógrafo Gama Industrial de 1ª Geração (TGI-1º)

O tomógrafo de 1ª geração usado é composto por uma fonte de transmissão gama de  $^{137}\text{Cs}$ , com atividade de  $3,7 \cdot 10^9 \text{ Bq}$ , tempo de meia-vida 30,1 anos e energia de fotopico em torno de  $662 \text{ keV}$ , a detecção é feita por um cintilador sólido de Iodeto de Sódio dopado com Tálcio  $\text{NaI(Tl)}$ , tanto na fonte quanto no detector estão montados colimadores de chumbo, ambos com diâmetro igual a 5,5mm e comprimento de 73mm. A distância entre fonte e detector foi de 344,0mm, durante todas as medidas.

O equipamento possui um sistema mecânico compostos por dois motores para movimentação (rotação e translação) da bandeja que está acoplado a um analisador multicanal MCA (modelo *Osprey* fabricado pela *Camberra Inc*), com um software de análise do espectro gama, onde as contagens são feitas pelo detector na área do fotopico, salvas no computador e armazenadas. A visão geral do tomógrafo é mostrada na Figura 17.

**Figura 17 – O TGI – 1º utilizado no experimento**



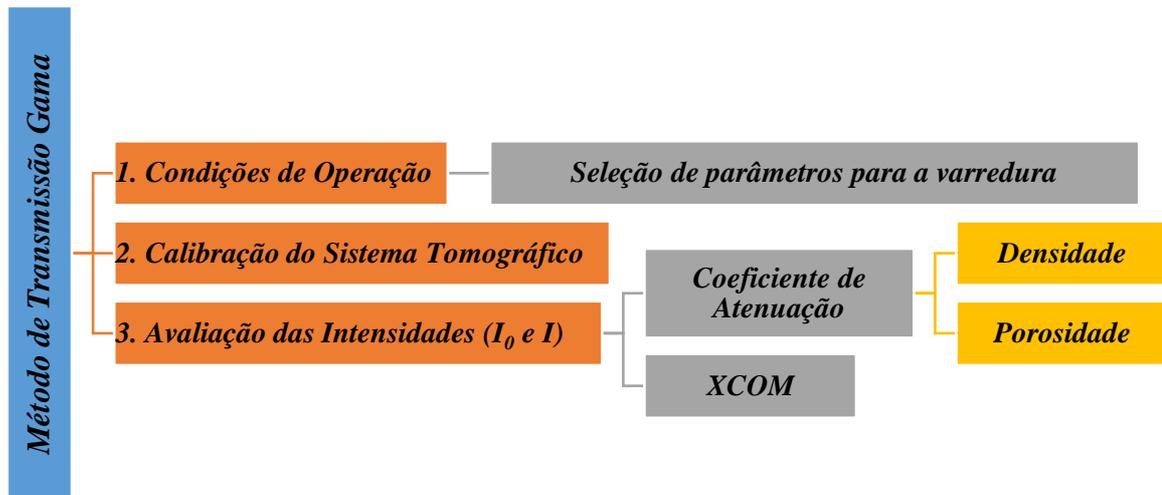
Fonte: Autoria própria

### 3.5 Planejamento do Experimento

Os testemunhos geológicos e os *phantoms* físicos de *Al* e *PVC*, foram irradiados nas mesmas condições de modo a comparar as medidas de transmissão gama a fim de calcular o coeficiente de atenuação e em seguida analisar a correlação entre as densidades aparente (método gravimétrico) e densidade radiométrica (método da transmissão gama) de todas as amostras e dessa forma quantificar a porosidade.

Com isso foi criado um fluxograma referente ao procedimento experimental utilizado nesse trabalho, apresentando de maneira esquemática o desenvolvimento deste experimento, como observado na Figura 18.

**Figura 18 – Fluxograma do procedimento experimental**

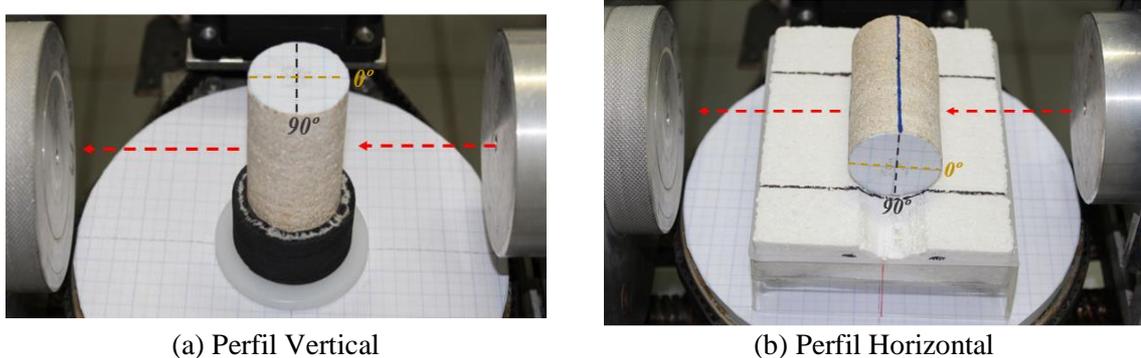


Fonte: Autoria própria

### 3.5.1 Condições de Operação

Para iniciar o experimento, as amostras foram posicionadas num suporte de acrílico, conforme as medidas da bandeja do equipamento. Em todas as amostras foram definidos pontos que identificam a rotação entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , além de estabelecer perfis (vertical e horizontal) no intuito de atender a movimentação de translação do TGI –  $1^\circ$ , com a finalidade de apresentar uma melhor condição experimental para este estudo. Conforme mostrado na Figura 19.

**Figura 19 - Perfis das amostras com suporte, caracterizando o movimento de translação, com direção do feixe e angulação**



(a) Perfil Vertical

(b) Perfil Horizontal

Fonte: Autoria própria

A descrição dos perfis das amostras na Figura 19 é baseada no feixe de radiação gama incidente perpendicularmente à amostra em (a) e na (b) o feixe de radiação incide paralelo

caracterizando o feixe em seção reta bem como é caracterizado o eixo de rotação para caracterizar o deslocamento angular em  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , ambos os perfis da amostra.

No sistema tomográfico foram definidos parâmetros para as condições de varredura completa dos perfis das amostras. Estes parâmetros estão listados na Tabela 4.

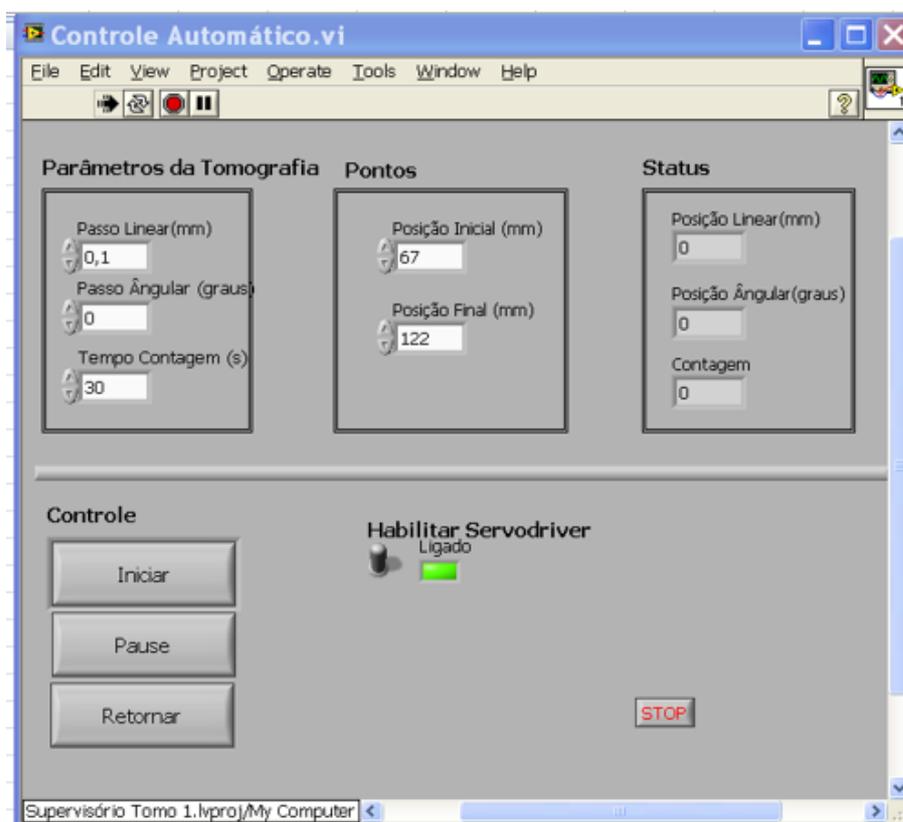
**Tabela 4 - Parâmetros selecionados para as varreduras no TGI – 1°**

Parâmetros	Valores Selecionados	
	Perfil Vertical	Perfil Horizontal
Tempo de contagem ( <i>s</i> )	30	30
Passo linear ( <i>mm</i> )	0,1	1
Posição inicial ( <i>mm</i> )	67	40
Posição final ( <i>mm</i> )	122	142

Fonte: Autoria própria

A Tabela 4 mostra os parâmetros de entrada ajustados no programa de controle automático da TGI – 1°, desse modo é observado o mesmo tempo de contagem para ambos os perfis, já no passo linear, que se refere ao deslocamento linear da mesa para aquisição dos dados, a varredura no perfil vertical obteve menor passo e, portanto, mais detalhes da porção vertical da amostra, já as posições inicial e final usadas foram estabelecidas de acordo com a variação dos perfis das amostras.

A seleção dos parâmetros acima citados, estão sendo mostrados na Figura 20 com a interface do programa utilizado.

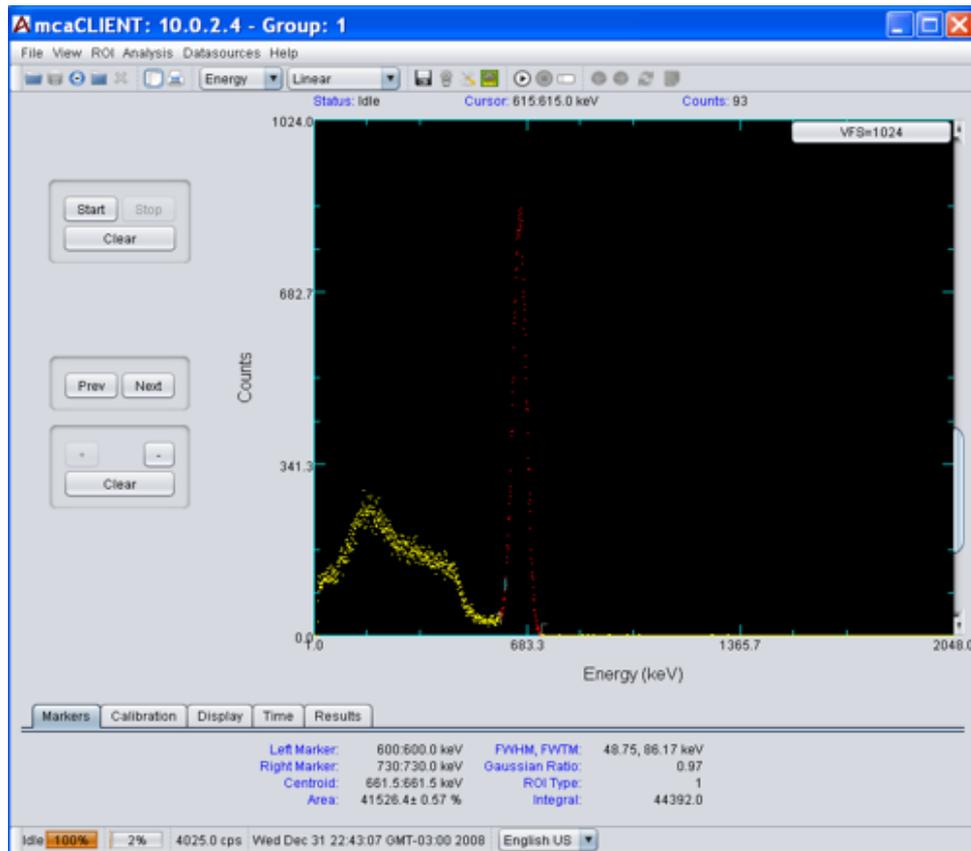
**Figura 20 - Interface do programa de controle automático da TGI – 1º**

Fonte: Autoria própria

A interface na Figura 20, apresenta os parâmetros de entrada que habilita a comunicação entre o computador e o sistema TGI – 1º através dos cabos de conexão.

O conhecimento do espectro do  $^{137}\text{Cs}$  foi necessário para ajustar as janelas do fotopico durante o procedimento experimental. O intervalo de energia (janela) do fotopico usado foi de 600 a 730 keV, cuja energia oscilante foi de 661,5 keV, servindo como referência para a marcação do fotopico (Figura 21).

Figura 21 – Intervalo da energia de fotopico do  $^{137}\text{Cs}$



Fonte: Autoria própria

### 3.5.2 Coeficiente de Atenuação Linear ( $\mu$ )

No processo de interação dos fótons de radiação gama, a expressão para a cálculo do coeficiente de atenuação linear, descrita na Equação 2 na Subseção 2.5.1, foi reescrita para descrição matemática mais detalhada, levando em consideração os furos presentes nas amostras simuladas. Essa abordagem pode ser expressa na Equação 17.

$$I = I_0 \cdot e^{-\varepsilon_s \rho_m \cdot \left(\frac{\mu}{\rho_m}\right) \cdot x} \quad (17)$$

em que  $\rho_m$  é a densidade do meio material ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e  $\varepsilon_s$  é a fração volumétrica do meio material, que está relacionada a quantidade de furos nas amostras.

### 3.5.3 Reta de Calibração do Sistema Tomográfico Experimental

Para uma determinação significativa dos parâmetros físicos de um meio material, faz-se necessário uma investigação detalhada da variação do coeficiente de atenuação linear para alguns materiais de prova. Os materiais selecionados para a calibração devem ser bastante homogêneos para garantir um bom ajuste linear entre coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) e a sua densidade ( $\rho$ ).

A calibração do sistema tomográfico consiste, basicamente, em se encontrar a relação existente entre  $\mu$  e  $\rho$  para os materiais homogêneos. Utilizando as Equações 2 e 7, para a obtenção dos valores a fim de se verificar a propriedade do sistema e definir as diferentes densidades.

Foram selecionados quatro materiais de prova, como: acrílico, alumínio, água destilada, e latão, mostrados na Figura 22, como também mensuradas as dimensões externas do diâmetro de cada material de prova, com auxílio do paquímetro, identificado na Figura 10(b). Fez-se cinco medidas com o paquímetro posicionado em diferentes posições, a fim de obter boa reprodutibilidade e atender às incertezas de medição.

**Figura 22 – Materiais homogêneos utilizados no experimento**



(a) Acrílico

(b) Água

(c) Latão

(d) Alumínio

Fonte: Autoria própria

De posse dos valores do coeficiente de atenuação linear, montou-se uma reta de calibração, para investigar o  $\mu$  e comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados simulados via XCOM e os obtidos na literatura. Essa análise é de extrema importância para que se obtenha os melhores resultados na definição de materiais em geral.

### 3.6 Método Radiométrico

#### 3.6.1 Determinação da Densidade Radiométrica Aparente ( $\rho_{rap}$ )

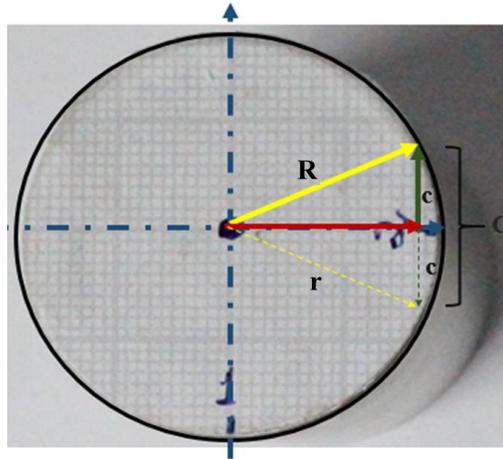
Com o método da transmissão de raios gama, é possível determinar experimentalmente a densidade, conhecida como a densidade radiométrica aparente ( $\rho_{rap}$ ) podendo ser calculada por meio da equação de Casa Grande (DANTAS *et al.*, 2006) que foi adaptada para este experimento como visualizada na Equação 19.

$$\rho_{rap} = \frac{1}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot C} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (19)$$

em que  $\mu$  é o coeficiente linear ( $cm^{-1}$ ) e  $\rho$  é a densidade do material absorvedor ( $g/cm^3$ ) e  $C$  é a corda total ( $cm$ ). Como o  $\mu$  está relacionado com a densidade, passa a ser chamado de coeficiente de atenuação de massa ( $\mu_m = \mu/\rho$ ) em  $cm^2/g$ . No caso dos *phantoms* físicos, o  $\mu_m$  é fornecido pelo XCOM.

Na Equação 19 acima, a espessura da amostra é inteiramente atravessada pelo feixe de raio gama, sabendo que estas amostras possuem uma geometria cilíndrica simétrica, é necessário calcular a corda cujo comprimento varia com cada passo da varredura, como é observado na Figura 23.

**Figura 23 - Esquema da variação da espessura ao longo do raio**



Fonte: Autoria própria

Na Figura 23, o  $R$  corresponde ao raio da amostra cilíndrica ( $mm$ ), o  $r$  é o deslocamento TGI – 1° na região da amostra ( $mm$ ) e o  $c$  refere a corda que varia ( $mm$ ), então tem – se:

$$C = 2\sqrt{R^2 - r^2}, \text{ para } -R \leq r \leq R \quad (20)$$

em que  $C$  se refere a corda total em  $mm$ .

### 3.6.2 Obtenção da Porosidade ( $\phi$ )

A melhor estimativa da porosidade no método de transmissão gama é possível com a combinação de densidade e coeficiente de atenuação linear de um material (ELLIS *et al.*, 2003). De maneira geral, pode-se relacionar os valores das densidades das amostras a fim de obter o grau de porosidade (PIRES, 2002). Esta abordagem pode ser matematicamente expressa por:

$$\phi = \left( 1 - \frac{\rho_{rap}}{\rho_m} \right) \cdot 100 \quad (21)$$

em que  $\rho_{rap}$  é a densidade radiométrica aparente em ( $g/cm^3$ ) pela transmissão gama e  $\rho_m$  é a densidade do material utilizado no experimento ( $g/cm^3$ ).

A outra maneira para a estimar a porosidade pela radiação gama, é por meio do coeficiente de atenuação linear dos materiais. Portanto, a porosidade pela técnica gama (PHOGAT e AYLMOORE, 1989), também pode ser calculado conforme:

$$\phi = \left( 1 - \frac{\mu_{ap}}{\mu} \right) \cdot 100 \quad (22)$$

sendo que  $\phi$  é a porosidade,  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear do material ( $cm^{-1}$ ) e  $\mu_{ap}$  é o coeficiente de atenuação linear aparente ( $cm^{-1}$ ), que segundo PHOGAT e AYLMOORE (1989), pode ser informado a partir da equação da reta de regressão linear da relação entre coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) com a densidade radiométrica aparente ( $\rho_{rap}$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é dedicado à apresentação dos resultados obtidos para a implementação do método de análise da densidade e porosidade em amostras geológicas a partir da comparação entre a técnica convencional e transmissão gama.

### 4.1 Análise do Método Gravimétrico

Segundo o procedimento descrito na Seção 3.1, as amostras foram mensuradas com os instrumentos especificados na Tabela 1 e seus resultados obtidos através de valores médios em cinco repetições, conforme visto nas Tabelas 2 e 3.

De acordo com as informações discutidas na Subseção 3.3.1, para determinar o volume das amostras foi calculado o volume total ( $v_t$ ) segundo a Equação 4, além do volume do poro ( $v_p$ ), conforme a Equação 5, e para os *phantoms* foi obtido o diâmetro do poro, correspondendo a  $0,3164 \pm 0,0011 \text{ cm}$  com  $k = 2,00$  para 95% de confiança.

Para determinar o  $v_p$  nos testemunhos geológicos, utilizou-se o método da convencional de porosimetria por expansão gasosa, como explicado na Subseção 3.3.4, em seguida foi encontrado o volume da parte sólida ( $v_s$ ), por meio da Equação 6.

Contudo na relação massa e volume, foi possível calcular a densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) incluindo os furos nos *phantoms* e a densidade do meio material ( $\rho_m$ ), como discutido na Subseção 3.3.2, calculados por meio das Equações 7 e 8, respectivamente.

A fim de estimar a porosidade nos testemunhos geológicos, o percentual de porosidade foi calculado através da Equação 1. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores médios das medidas, densidades e porosidade das amostras em estudo

Amostras	Volume ( $cm^3$ )			Densidade ( $g/cm^3$ )			Porosidade $\phi$
	$V_p$	$V_s$	$V_i$	$\rho_m$	$\rho_{ap}$		
<i>Phantom</i> <i>Al</i>	<i>P</i>	-	58,7309 ± 0,0024	58,7309 ± 0,0017	2,7079 ± 0,0015	2,7079 ± 0,0012	-
	<i>A</i>	1,9390 ± 0,0012	46,6216 ± 0,0027	48,5606 ± 0,0019	2,6989 ± 0,0023	2,5911 ± 0,0010	3,99%
	<i>B</i>	1,4104 ± 0,0023	57,5584 ± 0,0036	58,9688 ± 0,0021	2,6975 ± 0,0028	2,6330 ± 0,0020	2,39%
	<i>C</i>	0,5087 ± 0,0020	63,5798 ± 0,0045	64,0885 ± 0,0027	2,7049 ± 0,0036	2,6834 ± 0,0022	0,79%
<i>Phantom</i> <i>PVC</i>	<i>P</i>	-	58,8486 ± 0,0021	58,8486 ± 0,0032	1,5376 ± 0,0020	1,5376 ± 0,0010	-
	<i>A</i>	1,9390 ± 0,0012	46,5229 ± 0,0025	48,4619 ± 0,0010	1,5342 ± 0,0045	1,4728 ± 0,0015	4,00%
	<i>B</i>	1,4073 ± 0,0021	57,3935 ± 0,0032	58,8008 ± 0,0030	1,5354 ± 0,0021	1,4987 ± 0,0031	2,39%
	<i>C</i>	0,5115 ± 0,0011	63,6936 ± 0,0034	64,2051 ± 0,0017	1,5347 ± 0,0030	1,5225 ± 0,0026	0,80%
<i>Testemunhos</i> <i>Geológicos*</i>	<i>A</i>	6,9190 ± 0,0010	41,8266 ± 0,0030	48,7456 ± 0,0022	2,6790 ± 0,0027	2,2988 ± 0,0012	14,19%
	<i>B</i>	3,7490 ± 0,0020	54,7810 ± 0,0021	58,5300 ± 0,0041	2,8083 ± 0,0045	2,6284 ± 0,0015	6,41%
	<i>C</i>	9,8390 ± 0,0022	54,5275 ± 0,0010	64,3665 ± 0,0010	2,6783 ± 0,0021	2,2689 ± 0,0031	15,29%

\*Os Valores de  $V_p$  são obtidos pelo método de porosimetria por expansão gasosa, conforme apresentado na Subseção 3.3.4

Nessa Tabela 5 os valores estão representados com suas incertezas, calculadas por meio das Equações 11, 12 e 16, como sugerido na Subseção 3.3.5, sendo expressa a incerteza expandida com valores de  $k$  iguais ou próximos de 2,00 em todas as medidas, para um nível com 95% de confiança, segundo a tabela  $t$ -student.

## 4.2 Análise do Método de Transmissão Gama

### 4.2.1 Reta de Calibração

Com o objetivo de verificar o bom funcionamento do sistema de atenuação gama para estudo proposto nesse trabalho, foram feitas medidas do coeficiente de atenuação linear para os materiais homogêneos, mencionados na Subseção 3.5.3. Os parâmetros utilizados para realizar a varredura foram listados na Tabela 4.

Os valores experimentais de  $\mu$ , foram calculados conforme a Equação 3 e logo em seguida comparados com valores calculados gerados via XCOM, conforme apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Comparação entre os valores obtidos, XCOM e encontrados na literatura com respectivas referências para a energia de 662 keV do  $^{137}\text{Cs}$**

Material	Coeficiente de Atenuação Linear ( $\text{cm}^{-1}$ )			
	Presente trabalho	XCOM	Literatura	
			Valor	Autor
Acrílico	$0,0978 \pm 0,0040$	0,0983	$0,0666 \pm 0,0012$	
Alumínio	$0,2036 \pm 0,0022$	0,2017	$0,1939 \pm 0,0009$	Pires (2002)
Latão	$0,6045 \pm 0,0019$	0,5846	$0,5273 \pm 0,0012$	
Água destilada	$0,0821 \pm 0,0017$	0,0857	$0,0823 \pm 0,0005$	Pires (2002)
			$0,0834 \pm 0,0030$	Costa (2011)
			0,08535	Ferraz e Mansell (1979)

Foi observado na Tabela 6 uma boa concordância entre os dados experimentais para os materiais de prova o que representa um bom funcionamento do sistema tomográfico. O erro relativo percentual entre o valor teórico (XCOM) e o valor experimental de  $\mu$ , considerando o primeiro como referência, foi de 4,20% para a água e 3,40% para o latão, que apresentaram maiores em relação ao alumínio e o acrílico que foi de 0,94% e 0,51%, respectivamente.

A Tabela 7 traz os valores médios das densidades obtidas experimentalmente sendo comparadas com as densidades calculadas pelo XCOM.

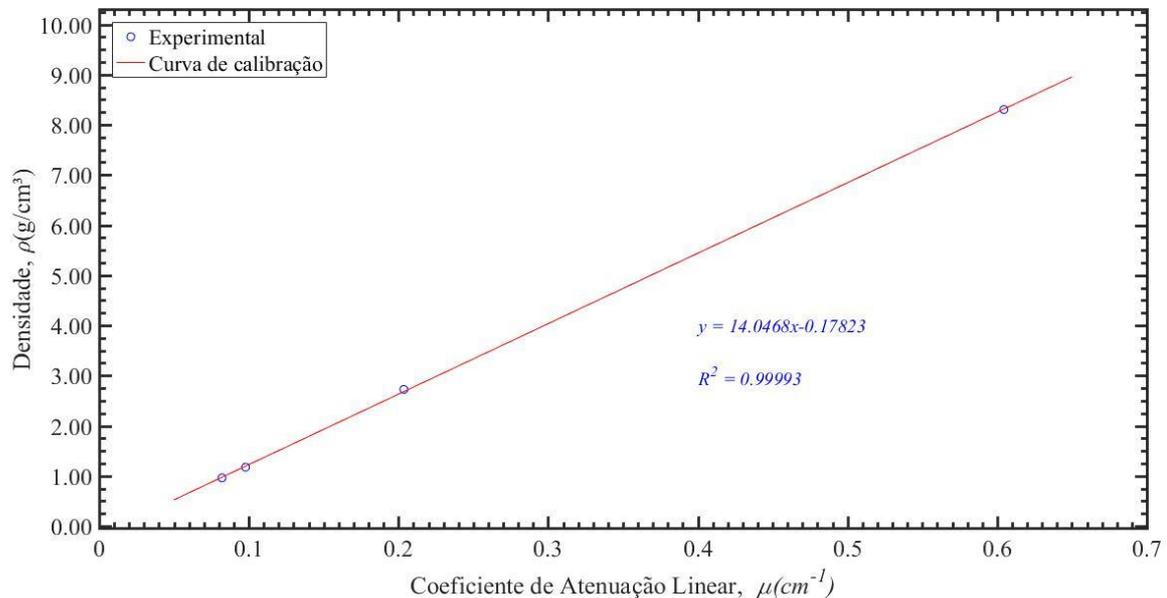
**Tabela 7 - Valores das densidades obtidos experimentalmente e comparados com as densidades dos materiais conhecidos no XCOM para energia de 662 keV do  $^{137}\text{Cs}$**

Material	Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		
	Presente trabalho	XCOM	Erro Relativo
Acrílico	$1,17 \pm 0,10$	1,18	0,45%
Alumínio	$2,72 \pm 0,11$	2,70	0,95%
Latão	$8,30 \pm 0,33$	8,03	3,41%
Água destilada	$0,96 \pm 0,10$	1,00	3,82%

É possível perceber na Tabela 7 que as densidades experimentais calculadas pela Equação 19, apresentaram-se semelhantes aos valores calculados pelo XCOM.

A Figura 24 mostra o gráfico de variação da densidade experimental ( $\rho$ ) em função do coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) de cada amostra deste experimento.

**Figura 24 – Relação entre o coeficiente de atenuação linear e a densidade radiométrica aparente para a calibração do sistema tomográfico utilizando dos materiais homogêneos**



A partir da Figura 24 é possível observar que os valores de  $\mu$  apresentaram-se coerentes com as densidades experimentais ( $\rho$ ) de acordo com a equação da calibração que é expressa por:

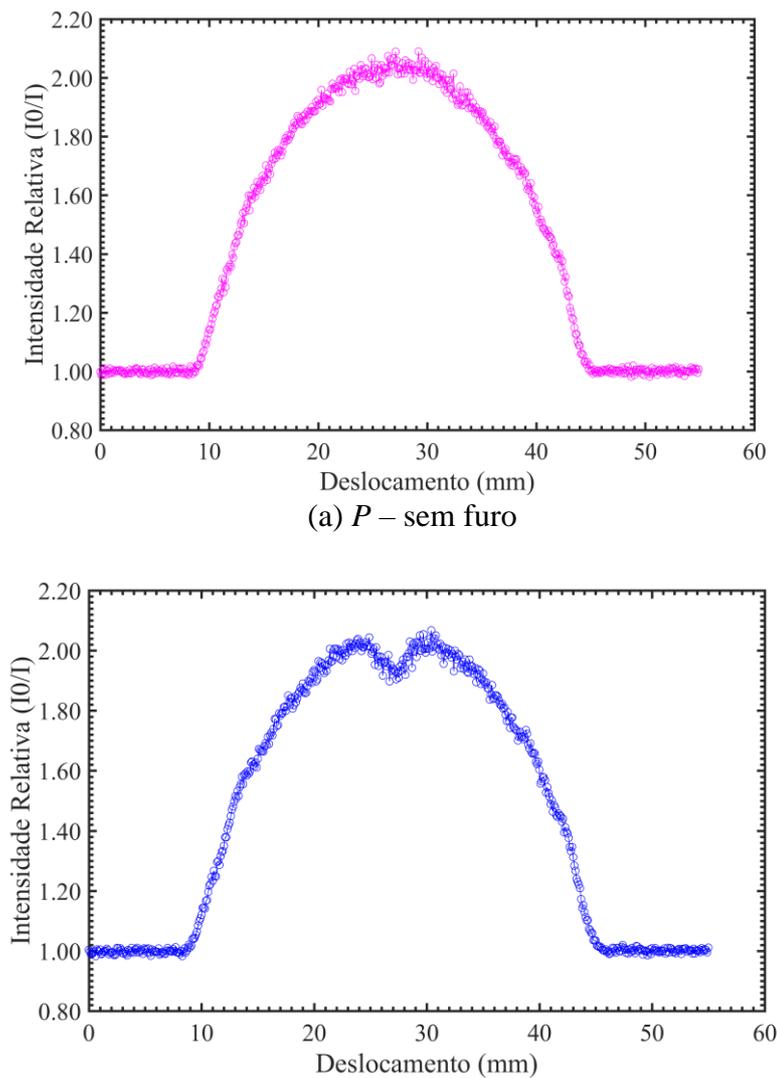
$$\rho = 14,0468\mu - 0,17823 \quad (23)$$

A análise do valor encontrado para o coeficiente de determinação  $R^2 = 0,99993$ , mostra que a reta de regressão linear está bem ajustada aos pontos obtidos experimentalmente para a densidade. E o coeficiente de correlação  $r$  foi de 0,9999 indicando que existe uma forte correlação positiva entre  $\rho$  e  $\mu$ . Estes valores permitem concluir que o sistema de atenuação de raios gama usado neste trabalho está em perfeito funcionamento.

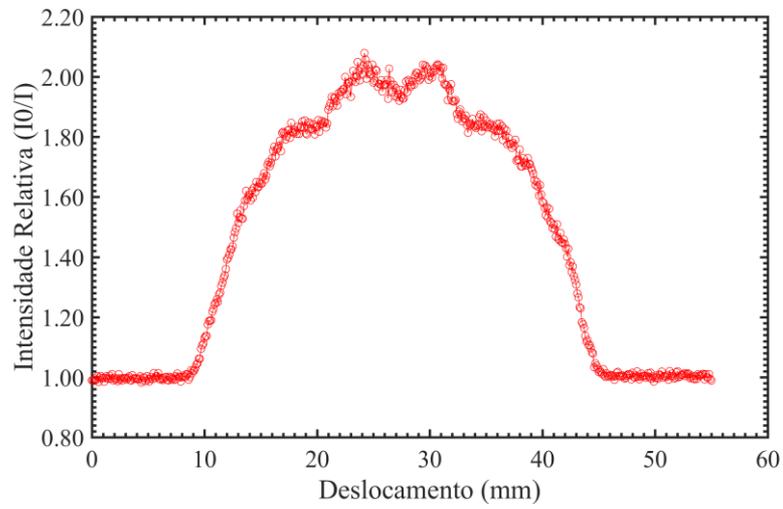
#### 4.2.3 Avaliação da Intensidade Relativa ( $I_0 / I$ )

Nas Figuras 25 e 26 verificam-se os perfis verticais quanto a dispersão da intensidade relativa em função do deslocamento dos *phantoms* físicos segundo as condições experimentais citadas na Tabela 4, da Subseção 3.5.1 para a TGI – 1°.

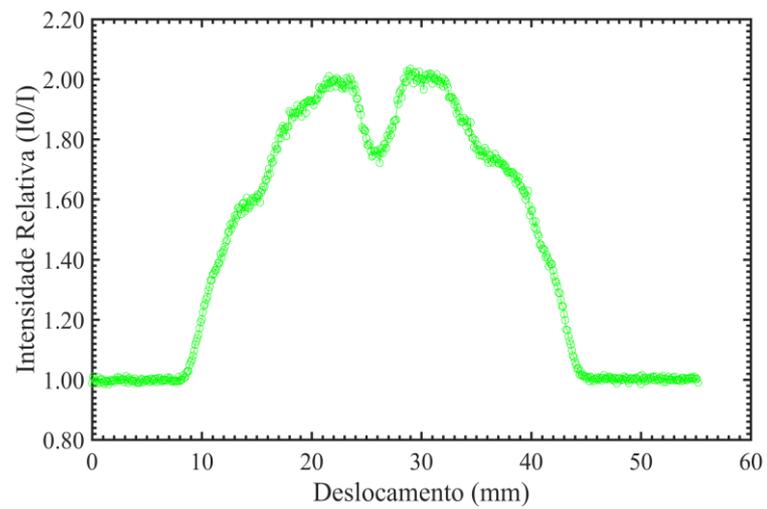
**Figura 25 – Representação dos perfis verticais do *phantom* físico de Al**



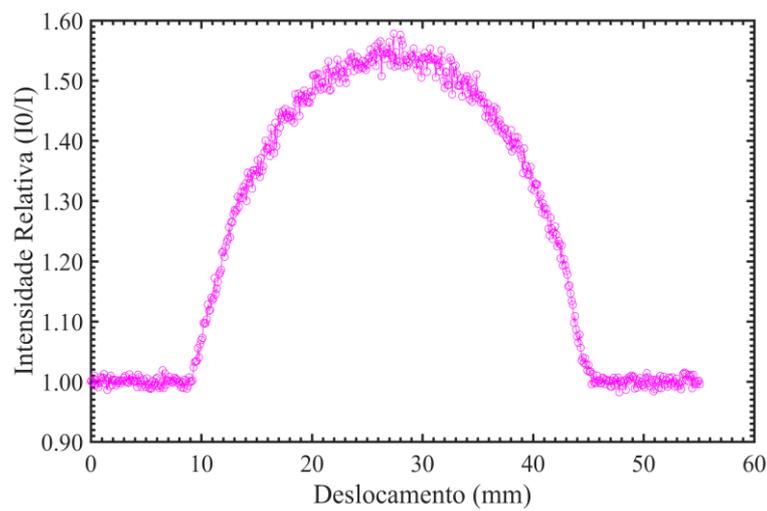
(b) C - 1 furo

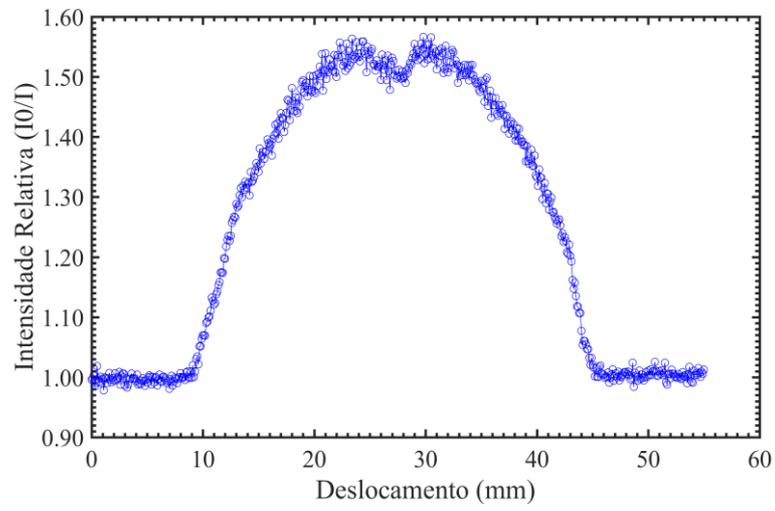
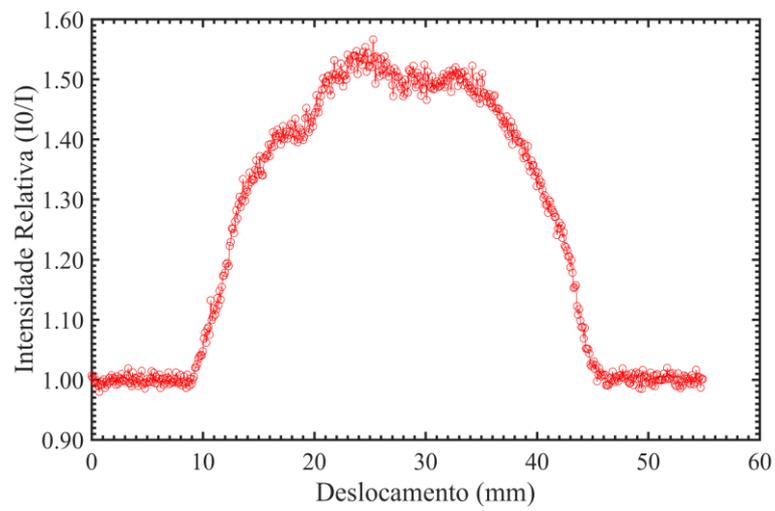
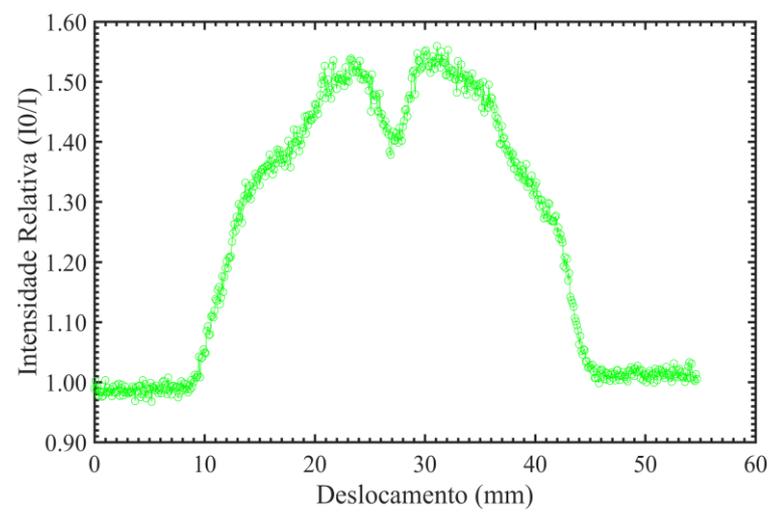


(c) B - 3 furos



(d) A - 5 furos

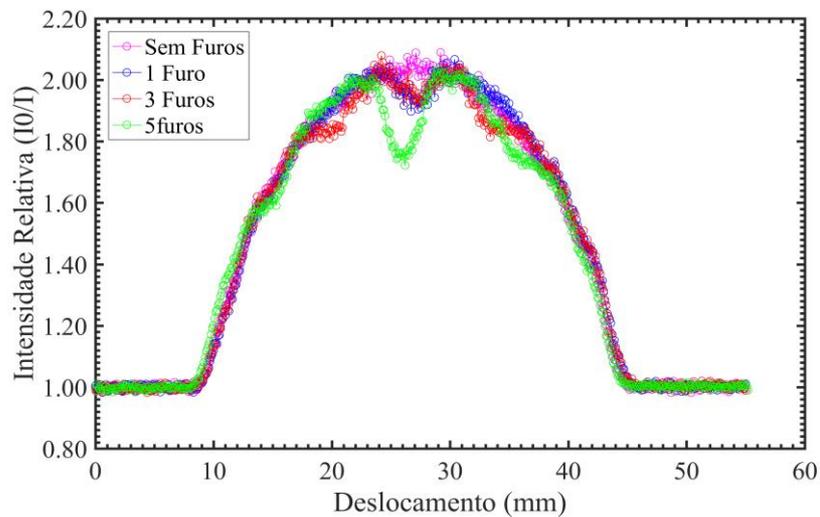
**Figura 26 – Representação dos perfis verticais do *phantom* físico de PVC**

(a) *P* – sem furo(b) *C* - 1 furo(c) *B*- 3 furos(d) *A* - 5 furos

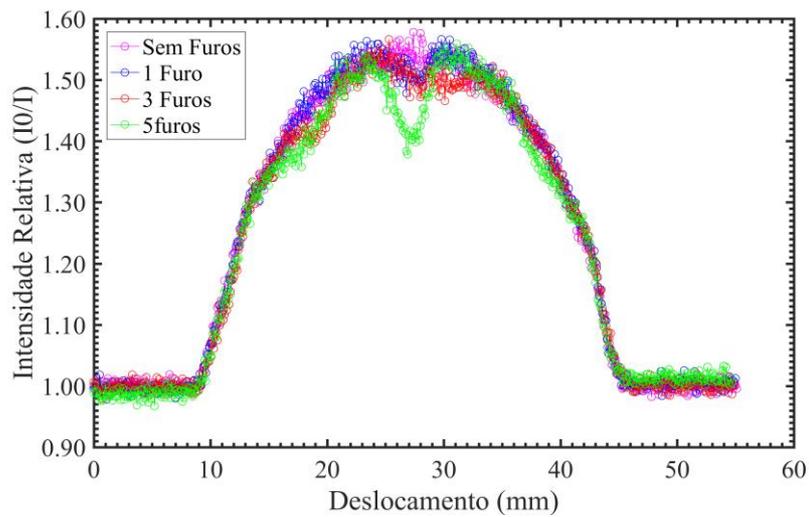
As Figuras 25 e 26 fornecem basicamente informações importantes a respeito do comportamento da intensidade em relação ao deslocamento, cujos gráficos demonstram claramente a quantidade de furos nesses *phantoms* (Figura 11) e portanto, as informações da porosidade foram suficientemente adequadas na representação dos espaços vazios.

A Figura 27 ilustra, mesmo que em sobreposição, a distribuição dos espaços vazios conforme previsto nos *phantoms* físicos propostos nesse trabalho

**Figura 27 – Comparativo entre os perfis verticais dos *phantoms* físicos**



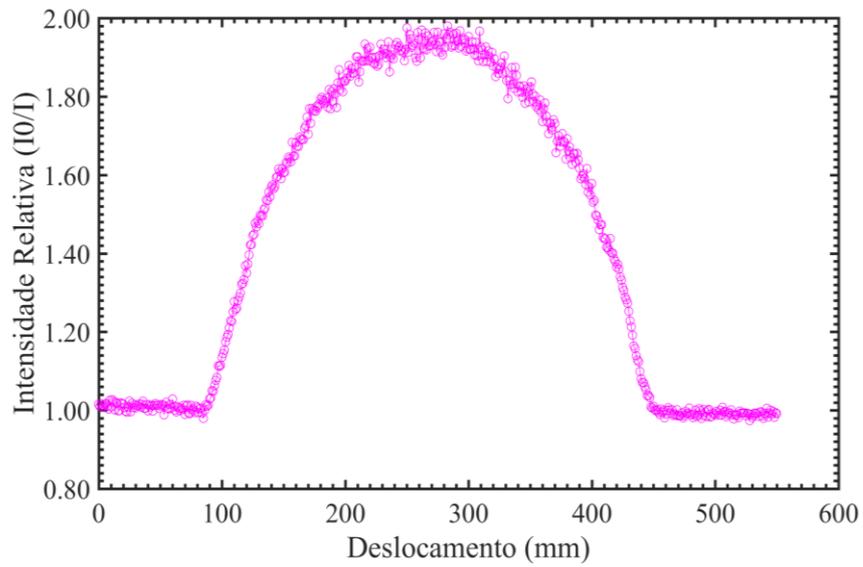
(a) *Phantom - Al*



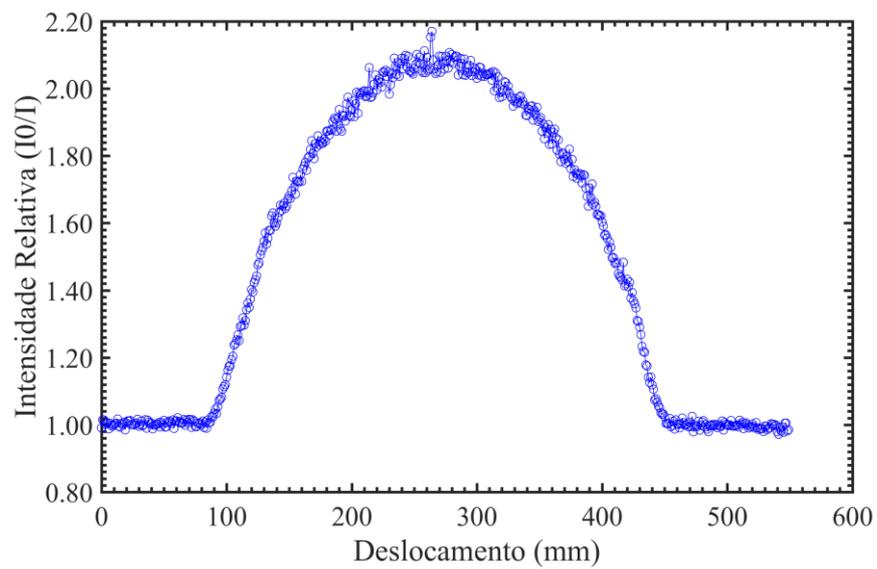
(b) *Phantom - PVC*

A Figura 28 demonstra o comportamento nos perfis verticais dos testemunhos geológicos, considerando as mesmas condições de varreduras referidas na Subseção 3.5.1, da Tabela 4.

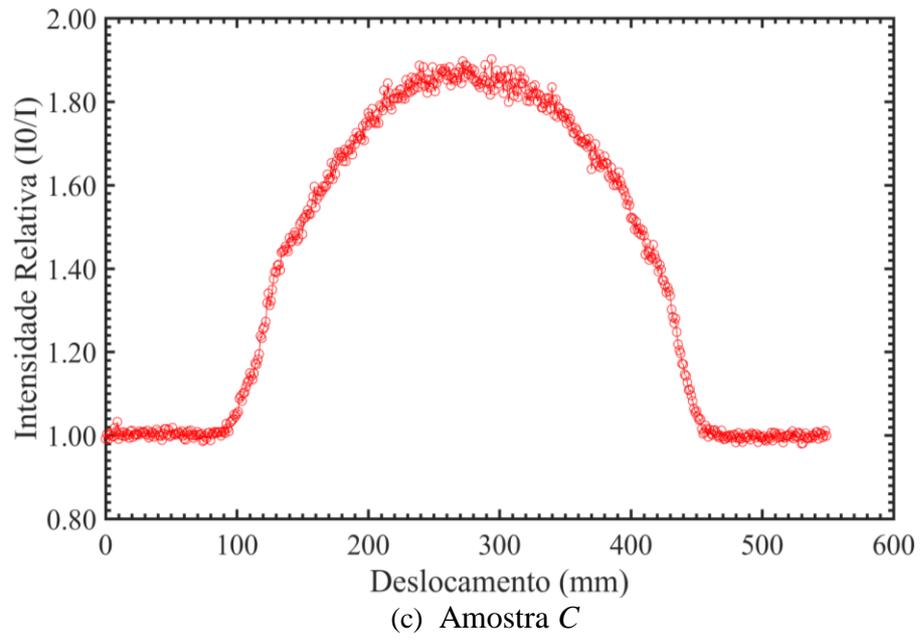
**Figura 28 – Perfis verticais dos testemunhos geológicos**



(a) Amostra A



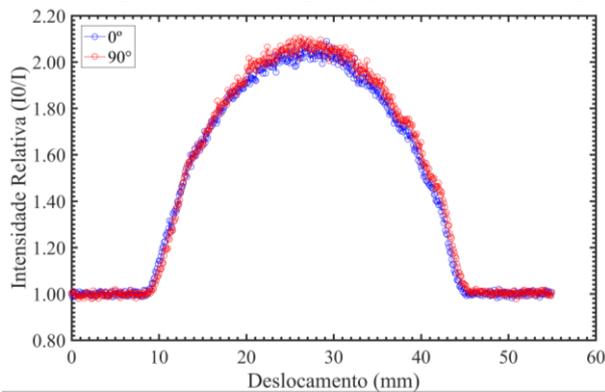
(b) Amostra B



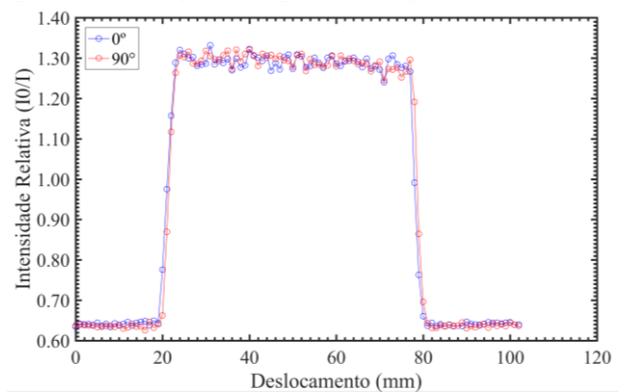
Nota – se que a intensidade relativa no centro das amostras apresentam valores máximos, conforme observa – se na Figura 28, este comportamento se deve aos valores das densidades aparente apresentados na Tabela 5. Em resumo, tem – se que a amostra *B* possui maior valor de intensidade relativa, seguido das amostras *A* e *C*, respectivamente.

Na Subseção 3.5.1 foi proposto o deslocamento angular em  $0^\circ$  e  $90^\circ$  das amostras em estudos (Figura 8), cuja rotação manual adotada para ambos os perfis nos *phantoms* sem furos identificados como *Padrão*. Como é o caso da Figura 29 que mostra a comparação entre os ângulos de rotação em relação a mudança do perfil vertical e/ou horizontal dos *phantoms* físicos.

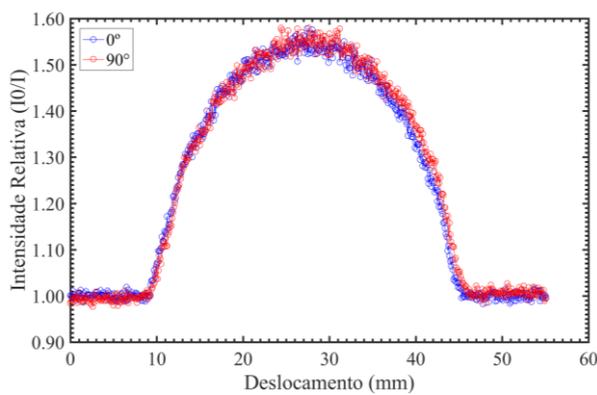
**Figura 29 – Comparação entre a variação dos ângulos de rotação e os perfis dos *phantoms***



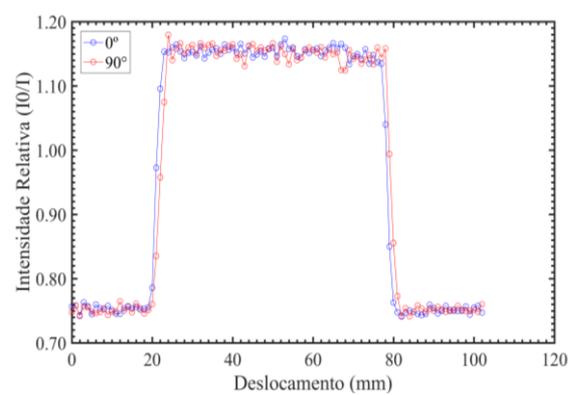
(a) *Al* - vertical



(b) *Al* - horizontal



(c) *PVC* - vertical

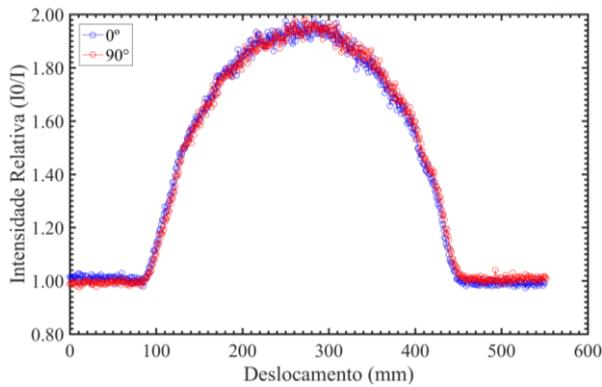


(d) *PVC* - horizontal

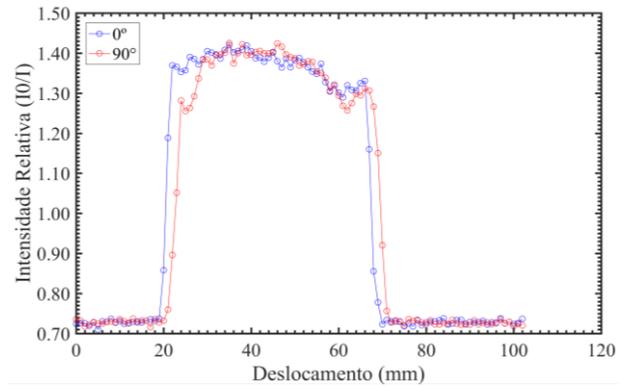
Assim na Figura 29 era esperado que não apresentasse uma variação significativa da intensidade relativa em função do deslocamento angular, já que os *phantoms* evidenciam características homogêneas nesses materiais.

A Figura 30 mostra as mesmas comparações entre o deslocamento angular nos testemunhos geológicos.

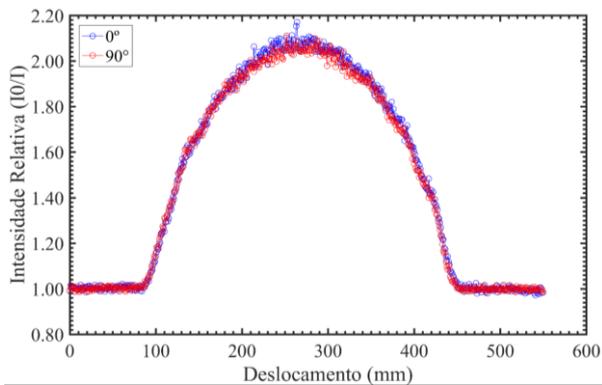
**Figura 30 – Comparação entre a variação dos ângulos de rotação e os perfis dos testemunhos geológicos**



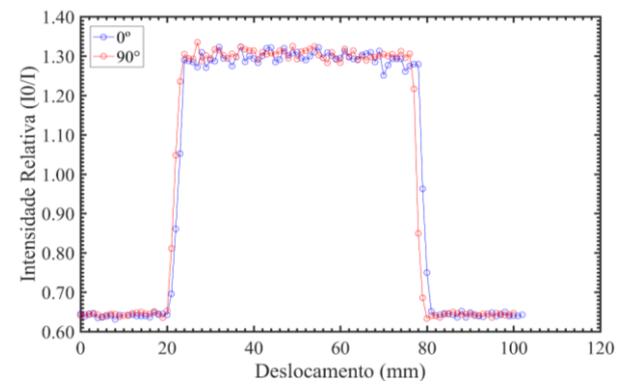
(a) Amostra A - vertical



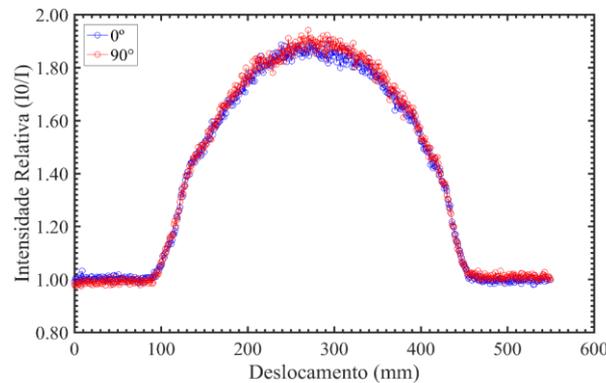
(b) Amostra A - horizontal



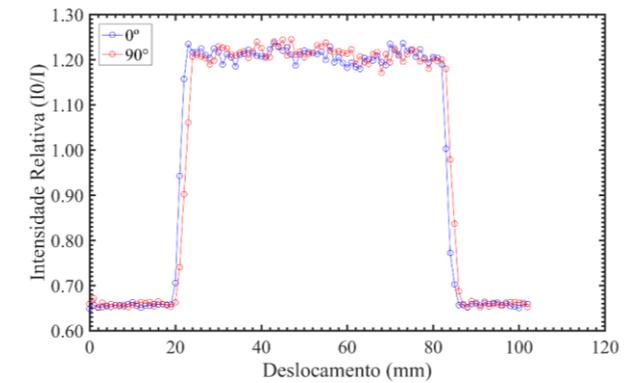
(c) Amostra B - vertical



(d) Amostra B - horizontal



(e) Amostra C - vertical



(f) Amostra C - horizontal

Ao analisar a Figura 30 é observado que tais diferenças nos ângulos de rotação do perfil vertical não foram significativas, no entanto, ao avaliar o perfil horizontal constata-se uma importante variação na amostra *A* e na amostra *C*.

#### 4.2.4 Medidas do Coeficiente de Atenuação Linear ( $\mu$ )

Sabendo que os *phantoms* físicos possuem valores de densidade e coeficientes de atenuação conhecidos e informados pelo NIST XCOM (2015), como mostrado na Tabela 8.

**Tabela 8- Valores teóricos de referência dos *phantoms* no NIST XCOM, para a energia de 662 keV do  $^{137}\text{Cs}$**

Material	Composição	Densidade $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Coeficiente de Atenuação	
			$\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\mu_m$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
<i>Al</i>	$^{13}\text{Al}$	2,70	0,20169	0,07470
<i>PVC</i>	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$	1,30	0,10313	0,07933

Fonte: NIST XCOM (2015)

As medidas do coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) obtidas foram calculadas conforme a Equação 17, evidenciada na Subseção 3.5.2, os seus resultados foram analisados e comparados de acordo com o perfil. Na Tabela 9 é apresentado o comparativo entre os dados experimentais de  $\mu$  e os valores de referência.

**Tabela 9 – Comparativo entre as medidas do coeficiente de atenuação de massa dos *phantoms* e os valores de referência do XCOM, para a energia de 662keV do  $^{137}\text{Cs}$**

Amostras	Perfil	Coeficiente de Atenuação de Massa ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )			
		Presente Trabalho	XCOM	Erro Relativo (%)	
<i>Phantom Al</i>	<i>P</i> Sem furos	Vertical	$0,07519 \pm 0,00023$	0,65%	
		Horizontal	$0,07462 \pm 0,00041$	0,10%	
	<i>A</i> 5 furos		$0,07448 \pm 0,00058$	0,07470	0,30%
	<i>B</i> 3 furos	Vertical	$0,07416 \pm 0,00030$		0,72%
	<i>C</i> 1 furo		$0,07508 \pm 0,00043$		0,51%
<i>Phantom PVC</i>	<i>P</i> Sem furos	Vertical	$0,07878 \pm 0,00018$	0,69%	
		Horizontal	$0,08020 \pm 0,00036$	1,09%	
	<i>A</i> 5 furos		$0,07851 \pm 0,00037$	0,07933	1,03%
	<i>B</i> 3 furos	Vertical	$0,07916 \pm 0,00030$		0,22%
	<i>C</i> 1 furo		$0,07981 \pm 0,00021$		0,61%

Pela Tabela 9, verifica-se que os valores do coeficiente de atenuação de massa para os *phantoms* foram coerentes com o erro relativo apresentando valores inferiores a 1,09%. Já a Tabela 10 mostra os valores do coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) para as amostras geológicas do presente trabalho.

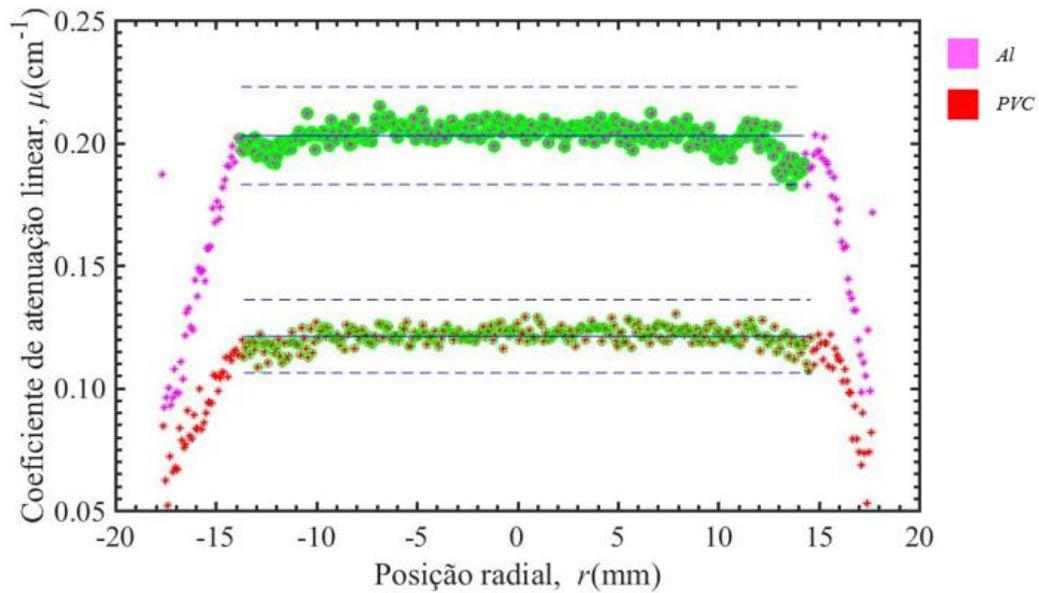
**Tabela 10 – Valores médios do coeficiente de atenuação linear dos perfis dos testemunhos geológicos, para a energia de 662 keV do  $^{137}\text{Cs}$**

<b>Amostras</b>	<b>Perfil</b>	<b>Coeficiente de Atenuação, <math>\mu</math> (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>
A	Vertical	$0,18699 \pm 0,00025$
	Horizontal	$0,18712 \pm 0,00058$
B	Vertical	$0,20185 \pm 0,00020$
	Horizontal	$0,20368 \pm 0,00035$
C	Vertical	$0,17713 \pm 0,00029$
	Horizontal	$0,17648 \pm 0,00074$

É notável na Tabela 10, que a variação entre os perfis foi pouco significativa, no entanto quando analisado o erro relativo é observado a diferença entre elas, correspondendo ao erro relativo de 0,07% na amostra A, na B apresentando 0,98% e na amostra C com 0,34%, caracterizando a heterogeneidade entre elas, considerando assim a amostra A menos heterogênea que a C e a B mais heterogênea.

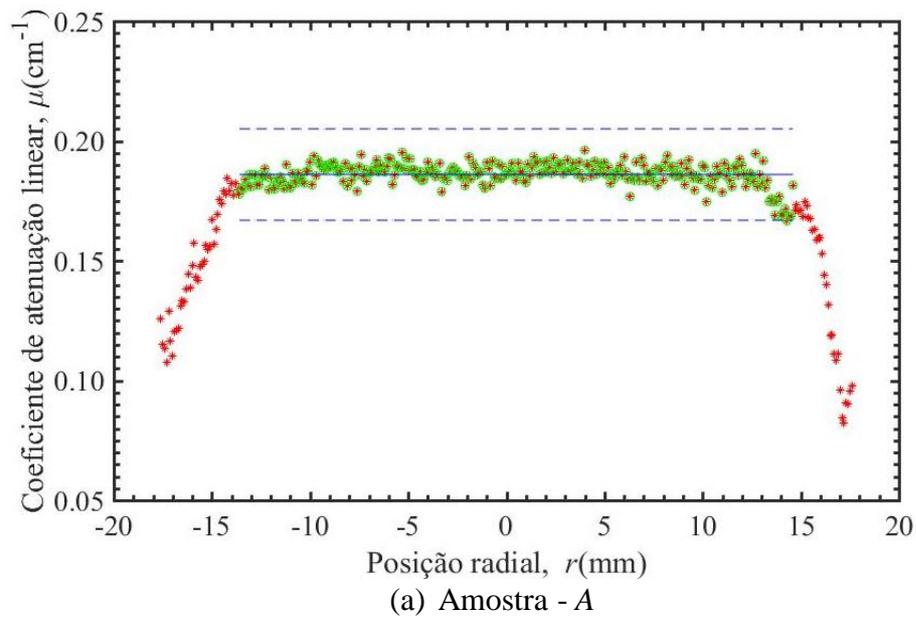
Na Figura 31 é observado a atenuação sofrida pelo deslocamento radial no interior da amostra, mostrando o respectivo desvio entre elas.

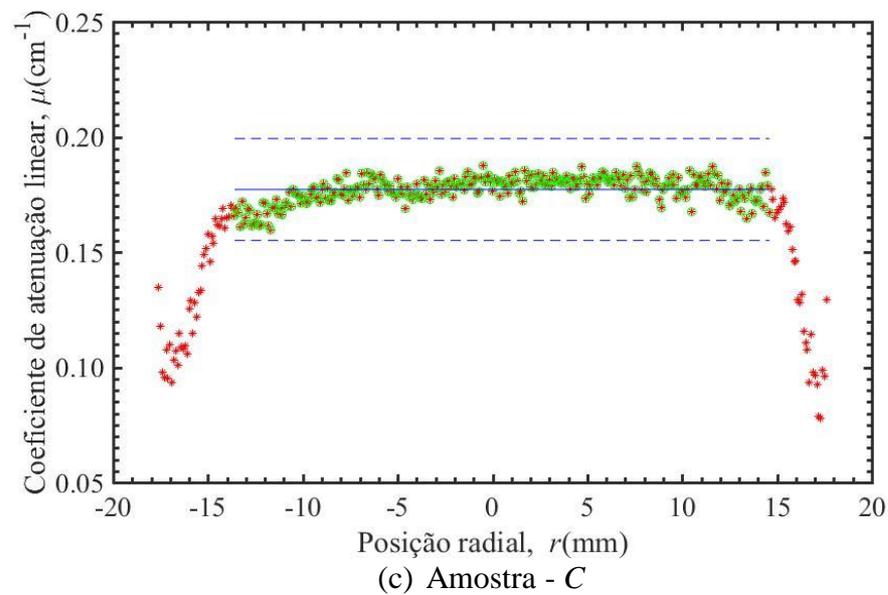
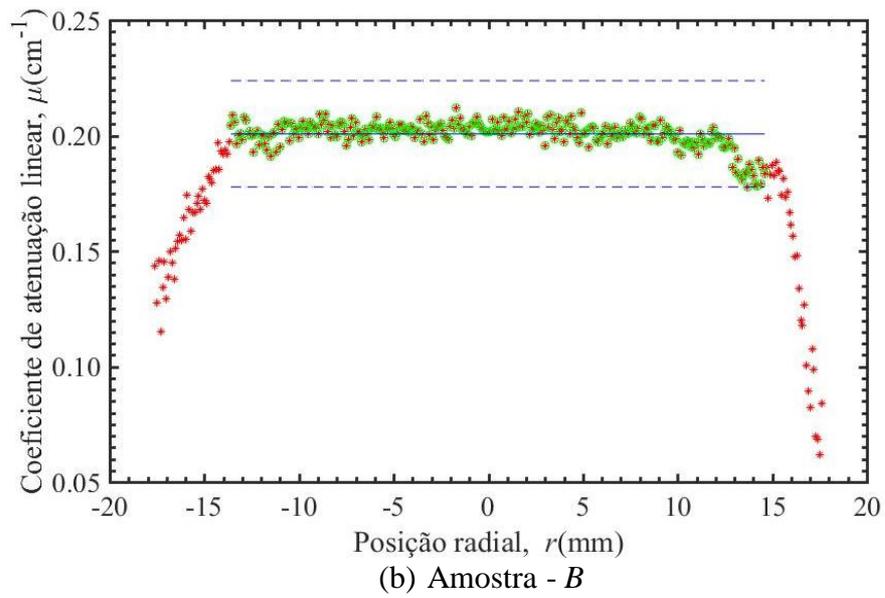
**Figura 31 – Distribuição da atenuação sofrida em relação a posição radial das amostras em estudo**



É possível verificar na Figura 31, a dispersão da atenuação em relação a distribuição radial nas amostras simuladas. Também podemos observar essa distribuição da atenuação na Figura 32.

**Figura 32 - Distribuição da atenuação sofrida em relação a posição radial nas amostras geológicas**





#### 4.2.5 Medidas da Densidade Radiométrica Aparente ( $\rho_{rap}$ )

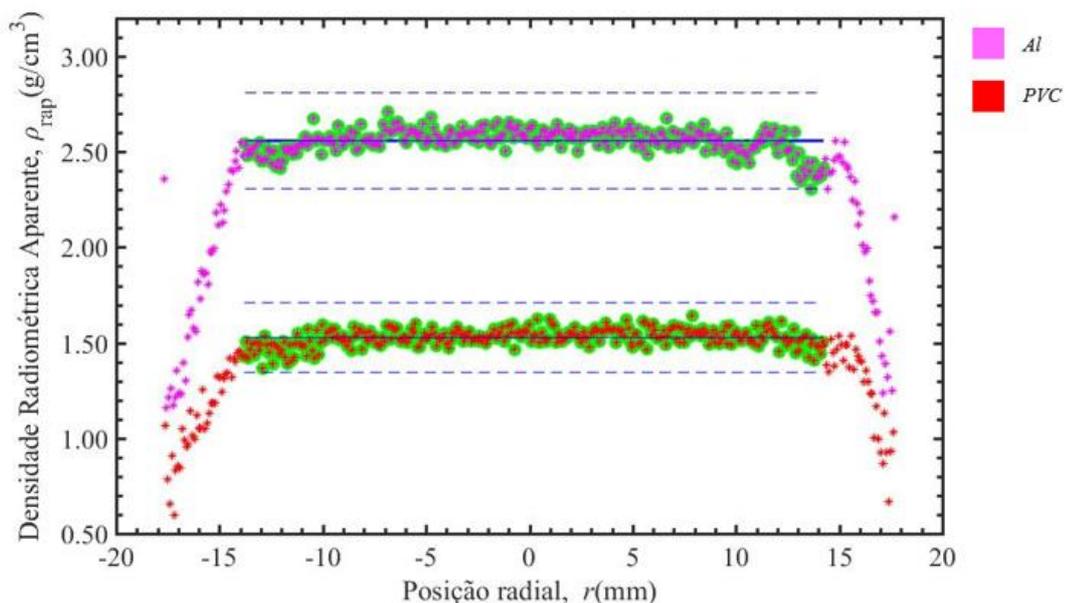
A densidade radiométrica foi calculada segundo a Equação 19 e para determiná-la foi preciso admitir valores para a corda, por meio da Equação 20, mencionado na mesma Subseção 3.6.1. Como visto na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores das densidades dos materiais em estudo.

Amostras			Densidades ( $\text{g/cm}^3$ )	
			$\rho_{ap}$	$\rho_{rap}$
Phantom Al	P	Sem furos	$2,7079 \pm 0,0010$	$2,7257 \pm 0,0031$
	A	5 furos	$2,5911 \pm 0,0021$	$2,5882 \pm 0,0028$
	B	3 furos	$2,6330 \pm 0,0023$	$2,6151 \pm 0,0011$
	C	1 furo	$2,6834 \pm 0,0030$	$2,6564 \pm 0,0025$
Phantom PVC	P	Sem furos	$1,5376 \pm 0,0020$	$1,5276 \pm 0,0010$
	A	5 furos	$1,4728 \pm 0,0010$	$1,4423 \pm 0,0033$
	B	3 furos	$1,4987 \pm 0,0012$	$1,4800 \pm 0,0029$
	C	1 furo	$1,5225 \pm 0,0026$	$1,5372 \pm 0,0032$
Testemunhos Geológicos	A	-	$2,2988 \pm 0,0011$	$2,4367 \pm 0,0040$
	B	-	$2,6284 \pm 0,0022$	$2,6585 \pm 0,0037$
	C	-	$2,2689 \pm 0,0010$	$2,2665 \pm 0,0023$

Constatou-se experimentalmente na Tabela 11, que a comparação entre as densidades obtidas pelo método gravimétrico ( $\rho_{ap}$ ) e método radiométrico ( $\rho_{rap}$ ) foram equivalentes, o que podemos concluir que o método pela transmissão gama é eficiente para determinação da densidade em amostras típicas de rochas reservatório.

A Figura 33 mostra a variação da densidade radiométrica aparente em relação ao deslocamento radial nas amostras em estudo.

Figura 33 - Representação da Densidade Radiométrica Aparente -  $\rho_{rap}$  ( $\text{g/cm}^3$ ).

Confere-se nos gráficos da Figura 33, os valores médios da densidade radiométrica na região interior dos materiais *Al* e *PVC*.

#### 4.2.6 Cálculo da Porosidade ( $\phi$ )

Os valores de porosidade das amostras dos materiais foram estimados utilizando a densidade do material e o coeficiente de atenuação do material, calculados por meio das Equações 21 e 22, descrito da Subseção 3.6.2. Estes respectivos valores estão apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 – Comparação entre os valores de porosidade nas amostras**

Amostras			Porosidade (%)	
			$\rho$	$\mu$
<i>Phantom Al</i>	A	5 furos	4,10	5,61
	B	3 furos	3,05	4,58
	C	1 furo	0,24	1,79
<i>Phantom PVC</i>	A	5 furos	5,99	6,18
	B	3 furos	3,61	3,80
	C	1 furo	0,16	0,04
<i>Testemunhos Geológicos</i>	A	-	9,04	8,48
	B	-	5,33	5,02
	C	-	15,38	14,42

Na Tabela 12, é possível observar que os dois modelos são válidos para estimar a porosidade, já que os valores encontrados conferem o esperado para os *phantoms* simulando o gradiente de porosidade.

A Tabela 13 apresentam os valores das porosidades, mostrando a comparação entre os métodos radiométrico e convencional que para as amostras geológicas foram determinadas por meio da porosimetria por expansão de gás, conforme descrito na Subseção 3.3.4

Tabela 13 – Valores das porosidades entre os métodos convencional e radiométrico.

Amostras			Porosidade (%)	
			Método Convencional	Método Radiométrico
<i>Phantom Al</i>	A	5 furos	3,99	5,61
	B	3 furos	2,39	4,58
	C	1 furo	0,79	1,79
<i>Phantom PVC</i>	A	5 furos	4,00	6,18
	B	3 furos	2,39	3,80
	C	1 furo	0,80	0,04
<i>Testemunhos Geológicos</i>	A	-	14,19	8,48
	B	-	6,41	5,02
	C	-	15,29	14,42

É possível concluir na Tabela 13, a viabilidade entre os métodos na estimativa da porosidade, já que a porosidade convencional se baseia no cálculo do volume total descrito na Equação 4 e a porosidade obtida por radiação, considera apenas um “corte” transversal na amostra.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no Capítulo 4, verifica - se que a técnica de atenuação de raios gama pode ser empregada de forma não destrutiva como um método auxiliar para determinar características físicas, tais como densidade e porosidade numa rocha reservatório de petróleo.

Este método por radiação gama apresentou boa sensibilidade e coerência nos resultados quando comparado com o método convencional. O método apresenta vantagens tais como: 1) não necessitar de qualquer preparação física ou química da amostra que permanece intacta e pronta para outros estudos, 2) baixo custo operacional, 3) utilização de um tomógrafo de 1º geração (simples) para obtenção das informações do interior da amostra, 4) curto tempo de aquisição dos dados, 5) é sensível nas determinações da densidade e porosidade.

Observou - se nos dados experimentais do coeficiente de atenuação de massa estão bem definidos, pois apresentaram valores para os *phantoms* físicos bem próximos aos valores teóricos obtidos com o *software* NIST XCOM, cujo o erro relativo foi menor que 0,72% para os *phantoms* de Al e para o PVC o erro foi inferior a 1,00% em relação ao teórico.

Em relação a mudança de perfil (horizontal ou vertical) para estes *phantoms*, na leitura da intensidade da transmissão da radiação gama para o cálculo do coeficiente de atenuação linear não apresentaram grandes mudança nos valores, no qual confirma o esperado, representando um material homogêneo. Realizando a mesma análise de mudança de posições para os testemunhos geológicos tem - se para a amostra A um erro relativo entre os valores dos coeficientes de atenuação linear de 0,07%, para a amostra B temos um valor de 0,98% e para amostra C tem - se 0,35%, o que reflete a uma ordem do aumento da heterogeneidade do meio nos materiais, ou seja, nas amostras A, C e B, respectivamente.

De maneira geral, os resultados obtidos a partir dos dois métodos demonstrados neste estudo apresentaram, evidentemente diferenças na estimativa da porosidade, levando em consideração que a porosidade adquirida pela radiação provém de apenas um corte transversal conferida na amostra e, portanto, a estimativa foi aceita pela equivalência na comparação com o método de porosimetria convencional, sendo importante ressaltar que este método apresenta diferenciação nos valores de leitura por não considerar os poros interconectados na amostra.

Sendo assim, na análise da porosidade, conforme esperado, o testemunho geológico de maior densidade como a *B*, apresentou menor estimativa de porosidade (5,02%) indicando que a amostra *B* é a menos porosa, em contrapartida, a amostra *C* de menor densidade demonstrou ser a amostra mais porosa, com 14,42% de porosidade.

Por fim a utilização da metodologia empregada neste trabalho se mostrou uma ferramenta útil para determinar os parâmetros petrofísicos em rochas reservatórias petrolíferas.

## 6 PERSPECTIVAS

A tomografia computadorizada para estudos geológicos pode levar as análises e pesquisas a novos patamares, ampliando o entendimento das propriedades das rochas especialmente distribuição espacial de poros, conexões de poros, vazios, entre outras propriedades importantes na avaliação de uma reserva petrolífera.

Com base nisso é possível propor alguns trabalhos que podem ser realizados futuramente para aperfeiçoar o método e utilizá-lo para novos estudos através da utilização da tomografia computadorizada de raios gama e X na caracterização petrofísica e suas propriedades, como: composição mineral, porosidade, densidade e permeabilidade, estabelecendo de técnicas de processamento e reconstrução de imagens tomográficas, aperfeiçoando algoritmos numéricos para a avaliação das propriedades petrofísicas importantes para as indústrias de petróleo.

## REFERÊNCIAS

AMINZADEH, F., DASGUPTA, S.N. **Geofísica para Engenheiros de Petróleo**. 1 Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

ABENDI – **Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção**. São Paulo, 2013 Disponível em < <http://www.abendi.org.br> >. Acessado em: 09 jan. 2017.

AKAR, A. et al, 2006, “**Measurement of attenuation coefficients for bone, muscle, fat and water at 140, 364 and 662 keV gamma-ray energies**”, Journal of Quantitative Spect. Radiation Transfer, v.102, pp. 203-211

ALAM, M.N. et al, 2001, “**Attenuation coefficients of soils and some building materials of Bangladesh in the energy range 276 – 1332 keV**”, Applied Radiation and Isotope, v.54, pp. 973-976.

ALVES, H. D. L. **Análise da Porosidade de Sedimentos Geológicos Usando a Técnica de Microtomografia Computadorizada**. Dissertação MSc. Programa de Engenharia Nuclear. COOPE/ UFRJ, 2012.

AMYX, J.W., BASS, D.M., WHITING, R.L. **Petroleum Reservoir Engineering Physical Properties**. McGraw-Hill, New York, NY. EUA,1960.

ANDREAS, S. **Forum Outerspace – Centro de Manutenção Aeronáutico**. Disponível em <<http://www.forum.outerspace.centrodemanutencaodemotoresajatoaeronaufotos.436263>> (2015). Acessado: 30 de out. 2017.

BATISTA, E.V., SCHELIN, H.R., EVSEEV, I., PASCHUK, S.A., KLOCK, M.C.L, SILVA, H.P., ROBERT, R., FILHO, V.S., LOPES, R.T., SANTOS, C.A.C., **Desenvolvimento de um Sistema de Tomografia Computadorizada Aplicado a Ensaio Não Destrutivos**. Revista Tecnologia & Humanismo. v.17.n.25, 2003.

BITTENCOURT, E. **Petróleo Infonet**, 2012. Disponível em < <http://petroleoinfonet.blogspot.com.br> > Acessado: 25 de out de 2017.

BODWADKAR, S.V. and REIS, J.C., **Porosity Measurements of Core Samples Using Gamma-Ray Attenuation**, Nucl. Geophys, vol 8, n° 1, 1994.

BORGES, J.A.R., PIRES, L.F., PEREIRA, A.B. **Tomografia computadorizada para estimar a área elementar representativa para medições de porosidade do solo.** The Scientific World Journal, 2012.

BUCHELI, A. J. **Estudo de Propriedades e Comportamento Geomecânicos de Rochas Reservatórios.** Dissertação de MSc. Rio de Janeiro. COOPE. UFRJ, 2005.

CARLSON, W &. KETCHAN, R. **Acquisition, Optimization and Interpretation of x ray Carbonate Reservoir Characterization: Possibilities and Limitations.** Marine and Petroleum Geology, 25. Pág 468 – 479, 2001.

COSTA, J. C. **Tamanho do colimador e espessura da amostra em medidas do coeficiente de atenuação de raios gama do solo.** Ponta Grossa, 2011.

CRESTANA, S. et al. **Tomografia Reconstitutiva.** In: CRESTANA, S. et al., ed. Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século. Brasília: EMBRAPA-SPI, Cap.4, p.152-200, 1996.

CRESTANA, S.; NIELSEN, D.R. **Investigações Não-destrutivas de Sistemas Porosos Multifásicos através de Microtomografia de Raios-X, Gama e Ressonância Magnética Nuclear (RMN).** In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS-ENEMP, 18., 1990, Nova Friburgo. Colégio Anchieta. v.2, p.699-710, 1990.

DANTAS, C. C. et al. **Measurement of Density Distribution of a Cracking Catalyst in Experimental Riser With a Sampling Procedure for Gamma Ray Tomography.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, p. 841–848, 2008.

DEMIR, F. **“Determination of mass attenuation coefficients of some boron ores at 59.54 keV by using scintillation”**, Applied Radiation and Isotope, v.68, pp.175-179, 2009.

EKINCI, N. and ASTAM, N. **“Measurement of mass attenuation coefficients of biological materials by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry”**, Radiation Measurements, v.42, pp. 428-430, 2007.

FERNANDES, J., APPOLONI, C. & FERNANDES, C. **Determinação de parâmetros Microestruturais e Reconstrução de Imagens 3D de Rocha Reservatório para Microtomografia de Raio X.** Revista Ciência Exatas e Naturais. Vol 11. 35-47, 2009.

FERGUSON, H.; GARDNER, W.H. **Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption.** Soil Science Society of America Journal, v.26, p.11-14, 1962.

FERRAZ, E.S.B.; MANSELL, R.S. **Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods**. Flórida: IFAS - Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 1979.

FONSECA, A.C.G. **Aplicação das Tomografias Gama e de Raios X em análise de Misturas Homogêneas de Solo com Óxido de Ferro e Alumínio**. Tese em Doutorado. Pós-Graduação em Tecnologia Energética e Nucleares, UFPE, 2017.

GEET, M.V., SWENNWN. R., WEVERS. M., **Towards 3-D Petrography: Application of Microfocus Computer Tomography in Geological Science, Computers & Geosciences**, v.27, 2001.

GURR, C.G. **Use of gamma rays in measurement of water content and permeability in unsaturated columns of soil**. Soil Science, v.94, p.224-229, 1962.

HUBBEL, J. H.; BERGER, M. J., **X-COM: Photon cross section on a personal computer**. NBSIR 87-3597, US Department of Commerce, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 1987.

LOPES, R.T., **Tomografia Computadorizada em Testes Não Destrutivos**. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro: COPPE – UFRJ, 1988.

MELANI, L. H., **Caracterização Petrofísica de Reservatório Carbonático**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo), Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2015.

MOREIRA, A.C e APPOLONI, C.R., **Determinação de Porosidade de Amostras de Cerâmica de Alumina e Carboneto de Boro por Transmissão de Raios Gama**, ISBN, 2009.

MOURA, A. E.; NERY, M. S.; BARBOSA, J. M.; ROLIM, T. L.; LIMA, E. A. O.; SANTOS, S. B. M. V. A. D. **Non-Destructive Evaluation of Weld Discontinuity in Steel Tubes By Gamma Ray CT**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B, ELSEVIER, 2015.

NIST **National Institute of Standards and Technology. XCOM**. 2015. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1-t.html>>. Acessado em: 18 jan. 2017.

KAPLAN, I. **Física Nuclear**. 2. ed. Rio de Janeiro-RJ: Editora Guanabara Dois S. A., 1978.

OLIVEIRA, K. M.; DANTAS, C. C., FERREIRA R. A. S.; LIMA, E. A. O., SANTOS, E. B. **Gamma Ray Ct and MCPX Simulation Applied to Weld Structure Investigation**. In: 8 World Congress on Industrial Process Tomography [S.I], The International Society for industrial Process Tomography, ISIPT, 2016.

OLIVEIRA, M. F. S. **Avaliação de Meios Geológicos Porosos por Técnicas Atômicas e Nucleares**. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Nuclear. COOPE/ UFRJ, 2012.

OLIVEIRA, O.M.C. **Geologia do Petróleo PGT - Petroleum Geoscience Technology**, 2017. Disponível em < [http:// www.pgt.com.br](http://www.pgt.com.br) >Acessado: 19 de out de 2017.

PEIXOTO, E. **Ebah**, 2014. Disponível em < <http://www.ebah.com.br> > Acessado: 25 de out de 2017.

PHOGAT, V.K., and AYLMOORE, L.A.G., **Evaluation of Soil Structure by Using Computer Assisted Tomography**, Soil Physics and Hydrology, vol 27, 1989.

PIRES, L. F. et al. **Twenty-five Years of Computed Tomography in Soil Physics: A Literature Review of The Brazilian Contribution**. Soil Till. Res., Amsterdam, v. 110, n. 2, p. 197-210, Nov, 2010.

PIRES, L.F. et al. **Gamma-ray computed tomography to characterize soil surface sealing. Applied Radiation and Isotopes**, Oxford, v.57, p. 375-380, 2002.

POTTKER, W. E., & APPOLONIL C. **Medida da Porosidade de Materiais Amorfos por Transmissão de Raios Gama**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Londrina, UEL, Londrina, 2000.

ROSA, A., CARVALHO, R. & XAVIER, J. **Engenharia de Reservatório de Petróleo**. Editora Interciência LTDA, 2006.

SAADIAND, A.J., SAADAN, A.K., **Using Gamma Ray Transmission for Determination of Porosity in Doped Alumina Samples**. Department of Physics, College of Education Ibn Al Haitham, University of Baghdad, 2011.

SCHON, J. **Propriedades Físicas das Rochas Aplicada à Engenharia: Fundamentos Teóricos e Práticos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SHINOHARA, A. H. ACIOLI, E. KHOURY, H. J. **Avaliação da Técnica de Radiografia Digital em Gamagrafia**. 6º Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos. Salvador, agosto. 2002.

SIEGBAHN, K. **Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy**. Amsterdam; New York: Oxford North-Holland Publishing Company, 1979.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Comparação entre os Métodos do Cilindro e do Torrão na Determinação da Porosidade e da Densidade do Solo**. Cienc. Rural, Santa Maria, v. 30, p. 1065-1068, abr. 2000.

SINMEC. **Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Flúidos**, 2003. Disponível em <<http://www.sinmec.ufsc.br/site/projeto>> Acessado: 08 fev. 2017.

SWEENEY, D.W., VEST, C.M., **Measurement of Three-dimensional Temperature Fields Above Heated Surface by Holographic Interferometry**. Inter.J.Heat and Mass Transf. V.17.n.12, 1974.

TEIXEIRA, W. FAIRCHILD, T. R. TOLEDO, M. C. M. TAIOLI, F. **Decifrando a Terra – 2a edição**. Companhia Editora Nacional. São Paulo, 2009.

TETZNER, G. C. **Aplicação da Tomografia Computadorizada Industrial na Análise de Rochas**. Dissertação de Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia e Aplicações Nucleares. USP. SP, 2008.

THOMAS, J.E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro – RJ, Ed Intercedência: PETROBRAS, 2004.

VAN BAVEL, C.H.M. **Soil densitometry by gamma transmission**. Soil Science, v.87, p.50-58, 1959

VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P.E.; REICHARDT, K.; STOLF, R. **Using a computed tomography miniscanner for studying tillage induced**, 1989.

VOMOCIL, J. A. **In situ measurement of bulk density of soil by gamma absorption technique**. Soil Sci., v.77, p.341342, 1954.