



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

EDUARDO INOCENTE JUSSIANI

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA NA CARACTERIZAÇÃO  
MICROESTRUTURAL DE ROCHAS POR  
MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X**

---

Londrina  
2012

EDUARDO INOCENTE JUSSIANI

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA NA CARACTERIZAÇÃO  
MICROESTRUTURAL DE ROCHAS POR  
MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Curso de Pós-Graduação, em Física, da  
Universidade Estadual de Londrina, como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Appoloni.

Londrina  
2012

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da  
Universidade Estadual de Londrina.**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

J96i Jussiani, Eduardo Inocente.  
Influência da energia na caracterização microestrutural de rochas por  
microtomografia de raios X / Eduardo Inocente Jussiani. – Londrina,  
2012.  
114 f. : il.

Orientador: Carlos Roberto Appoloni.  
Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina,  
Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós -Graduação em Física, 2012.  
Inclui bibliografia.

1. Física nuclear – Teses. 2. Microtomografia de raios X – Teses. 3.  
Técnicas e aplicações nucleares – Teses. 4. Rochas – Teses. I. Appoloni,  
Carlos Roberto. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências  
Exatas. Programa de Pós-Graduação em Física. III. Título.

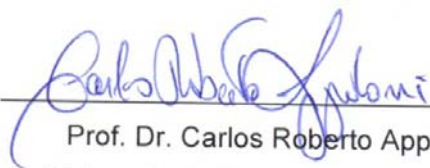
CDU 539.146

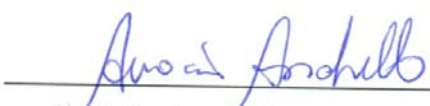
EDUARDO INOCENTE JUSSIANI


**INFLUÊNCIA DA ENERGIA NA CARACTERIZAÇÃO  
MICROESTRUTURAL DE ROCHAS POR MICROTOMOGRAFIA DE  
RAIOS X**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Curso de Pós-Graduação, em Física, da  
Universidade Estadual de Londrina, como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

  
Prof. Dr. Carlos Roberto Appoloni  
Universidade Estadual de Londrina

  
Prof. Dr. Avacir Casanova Andrello  
Universidade Estadual de Londrina

  
Dr. Rodrigo Surmas  
CENPES/PETROBRAS

Londrina, \_\_\_\_ de \_\_\_\_ de 2012.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por tudo que me proporcionou ao longo da vida.

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto Appoloni pela orientação desde os tempos de iniciação científica e amizade sempre.

A minha mãe e familiares por estarem sempre junto comigo, seja nas horas de alegria, seja nas horas de tristeza. Também agradeço à Vanessa M. Leite, por sempre estar comigo me ajudando e incentivando.

Aos professores doutores Avacir Casanova Andrello e Marcos de Castro Falleiros e ao doutor Rodrigo Surmas que aceitaram participar da banca de qualificação e/ou defesa, por terem contribuído nesse trabalho.

Ao pessoal do Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da UEL pela amizade e companheirismo sempre.

À CAPES pelo apoio financeiro e ao Departamento de Física – professores, alunos e funcionários – pela amizade e aprendizado.

Aos amigos que sempre estiveram do meu lado durante o mestrado.

JUSSIANI, Eduardo Inocente. **Influência da energia na caracterização microestrutural de rochas por microtomografia de raios X.** 2012. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina.

## RESUMO

A microtomografia é uma importante ferramenta nos estudos de propriedades internas de objetos por ser uma técnica não destrutiva. Recentemente, cresceu o interesse em caracterizar as amostras em relação às suas composições, principalmente rochas, utilizando essa metodologia. Nesse trabalho, sete amostras de materiais com densidades que variaram de 2,42 até 6,84 g/cm<sup>3</sup> e com números atômicos efetivos de 15 a 77,3 foram estudadas. Para isso, utilizou-se um microtomógrafo SkyScan 1172, operando nas tensões de 50, 60, 70, 80, 90 e 100 kV com resolução de 13,1 µm. Foram calculados tons médios de cinza para cada amostra e para cada energia e realizados estudos de correlação desse valor com a densidade e com o número atômico efetivo das amostras. Ajustes lineares foram obtidos para cada energia. As funções obtidas foram testadas com amostras de materiais conhecidos.

**Palavras-chave:** Microtomografia de raios X. Rochas.

JUSSIANI, Eduardo Inocente. **Influence of energy on microstructural characterization of rocks by X-ray microtomography**. 2012. Dissertation (MSc. in Physics) – State University of Londrina.

### **ABSTRACT**

The microtomography is an important tool in studies of internal properties of objects as a result in being a non-destructive technique. Recently, through this methodology, the interest in characterizing the samples in relation to their composition increased, especially in rocks. In this study, seven samples of materials with densities ranging from 2.42 to 6.84 g/cm<sup>3</sup> and effective atomic numbers 15 to 77.3 were studied. To do this, we used a microtomógrafo SkyScan 1172, operating at voltages of 50, 60, 70, 80, 90 and 100 kV with a resolution of 13.1 micrometers. We calculated the average gray shades for each sample and for each energy and studied the correlation of this value with the density and effective atomic number of the samples. Linear fits were obtained for each energy. The functions obtained were tested using samples of known materials.

**Keywords:** X-ray.microtomography. Rocks.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> –	Esquema de um tubo de Coolidge para a produção de raios X .....	17
<b>Figura 2</b> -	Efeito Fotoelétrico .....	18
<b>Figura 3</b> -	Efeito Compton .....	19
<b>Figura 4</b> -	Espalhamento Rayleigh .....	20
<b>Figura 5</b> -	Espalhamento Thomson .....	21
<b>Figura 6</b> –	Transmissão de raios X para uma amostra homogênea, usando uma radiação monocromática .....	24
<b>Figura 7</b> –	Transmissão de raios X para uma amostra não-homogênea, usando uma radiação monocromática .....	24
<b>Figura 8</b> –	Transmissão de raios X para uma amostra não-homogênea, usando uma radiação policromática.....	25
<b>Figura 9</b> –	Medida com um tomógrafo de primeira geração.....	26
<b>Figura 10</b> –	Medida com um tomógrafo de segunda geração .....	27
<b>Figura 11</b> –	Medida com um tomógrafo de terceira geração.....	27
<b>Figura 12</b> –	Medida com um tomógrafo de quarta geração.....	28
<b>Figura 13</b> –	Representação do sistema de aquisição de dados da câmara CCD .....	29
<b>Figura 14</b> -	(A) Imagem bidimensional formada por elementos de área e (B) Imagem tridimensional caracterizada por elementos de volume.....	30
<b>Figura 15</b> -	Projeções paralelas dadas pelo arranjo de raios paralelos para diferentes ângulos.....	32
<b>Figura 16</b> -	Arranjo tomográfico com detectores alinhados na forma de um semicírculo .....	34
<b>Figura 17</b> -	Arranjo tomográfico com mesmo ângulo entre as linhas de radiação incidente e com espaçamentos diferentes de chegada aos detectores.....	34
<b>Figura 18</b> -	Esquema de transformação das coordenadas cartesianas em polares .....	35
<b>Figura 19</b> -	Parâmetros usados no algoritmo de reconstrução de imagem .....	36
<b>Figura 20</b> -	Surgimento do artefato <i>beam hardening</i> em uma imagem microtomográfica.....	37

<b>Figura 21</b> - Imagem com o artefato anel (à esquerda) e a mesma imagem corrigida via software (à direita) .....	38
<b>Figura 22</b> – Amostras dentro do suporte de plástico (esquerda) e um esquema da disposição das amostras dentro dele (direita) .....	40
<b>Figura 23</b> – Modelo esquemático da composição do microtomógrafo SkyScan 1172 .....	43
<b>Figura 24</b> – Microtomógrafo SkyScan 1172 instalado no LARX/UEL.....	43
<b>Figura 25</b> – Microtomógrafo SkyScan 1172 instalado no LARX/UEL – detalhe do porta amostras.....	44
<b>Figura 26</b> - Espectro típico de um tubo de raios X com alvo de Tungstênio em função da tensão aplicada .....	45
<b>Figura 27</b> – Projecção de uma medida em 100 kV mostrando que as amostras excedem o tamanho do detector .....	49
<b>Figura 28</b> – Tom de cinza <i>versus</i> densidade usando um parâmetro de reconstrução e usando parâmetros de reconstrução individuais .....	52
<b>Figura 29</b> - Reconstrução de uma fatia 2D das amostras, tendo como base os parâmetros de reconstrução da ardósia, para 100 kV (entre parênteses está o número da fatia).....	53
<b>Figura 30</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras <i>versus</i> suas densidades usando os parâmetros de reconstrução da ardósia como base (100 kV).....	54
<b>Figura 31</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras <i>versus</i> seus números atômicos efetivos usando os parâmetros de reconstrução da ardósia como base (100 kV).....	55
<b>Figura 32</b> - Reconstrução de uma fatia 2D das amostras, tendo como base os parâmetros de reconstrução da fluorita, para 100 kV (entre parênteses está o número da fatia).....	56
<b>Figura 33</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras <i>versus</i> suas densidades utilizando como base os parâmetros de reconstrução da fluorita (100 kV) .....	57
<b>Figura 34</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras <i>versus</i> seus números atômicos efetivos utilizando como base os parâmetros de reconstrução da fluorita (100 kV) .....	57

<b>Figura 35</b> - Reconstrução de uma fatia 2D das amostras, tendo como base os parâmetros de reconstrução da hematita, para 100 kV (entre parênteses está o número da fatia).....	58
<b>Figura 36</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades utilizando como base os parâmetros de reconstrução da hematita (100 kV) .....	59
<b>Figura 37</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos utilizando como base os parâmetros de reconstrução da hematita (100 kV).....	60
<b>Figura 38</b> – Fatia da fluorita reconstruída com os mesmos parâmetros em três tensões diferentes .....	62
<b>Figura 39</b> – Regiões da fatia da amostra fluorita usadas para o cálculo do contraste .....	63
<b>Figura 40</b> – Perfil de transmissão da radiação na amostra mármore branco em 100 kV (acima) e 50 kV (abaixo) .....	64
<b>Figura 41</b> – projeções das amostras em diferentes energias. ....	66
<b>Figura 42</b> – fatias 2D reconstruídas das amostras nas energias estudadas nesse trabalho.....	67
<b>Figura 43</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para pré-validação da técnica, incluindo a calcita.....	68
<b>Figura 44</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para pré-validação da técnica.....	69
<b>Figura 45</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para validação da técnica.....	70
<b>Figura 46</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 100 Kv.....	72
<b>Figura 47</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 100 kV .....	73
<b>Figura 48</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 100 kV .....	73

<b>Figura 49</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 100 kV.....	74
<b>Figura 50</b> – Tom de cinza obtido para as amostras nas diferentes energias estudadas nesse trabalho .....	76
<b>Figura 51</b> – Fatias reconstruídas utilizando os parâmetros da fluorita em 100 kV para a amazonita (esquerda) e gabro (direita).....	79
<b>Figura 52</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para o caso da amazonita e gabro (80 kV) .....	80
<b>Figura 53</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para o caso da amazonita e gabro (80kV) .....	81
<b>Figura 54</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para o caso amazonita e gabro (80 kV).....	81
<b>Figura 55</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para o caso amazonita e gabro (80 kV).....	82
<b>Figura 56</b> – Fatias reconstruídas utilizando os parâmetros da fluorita em 100 kV para a arenito (esquerda) e sodalita (direita) também em 100 kV .....	84
<b>Figura 57</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para o caso do arenito e sodalita (100 kV).....	85
<b>Figura 58</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para o caso do arenito e sodalita (100kV) .....	86
<b>Figura 59</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para o caso do arenito e sodalita (100 kV).....	86
<b>Figura 60</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para o caso do arenito e sodalita (100 kV) .....	87
<b>Figura 61</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 50 kV.....	97

<b>Figura 62</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 50 kV .....	97
<b>Figura 63</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos, em escala linear, para 50 kV .....	98
<b>Figura 64</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 50 kV.....	99
<b>Figura 65</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 60 kV.....	101
<b>Figura 66</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 60 kV.....	101
<b>Figura 67</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 60 kV .....	102
<b>Figura 68</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 60 kV.....	102
<b>Figura 69</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 70 kV.....	104
<b>Figura 70</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 70 kV.....	104
<b>Figura 71</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 70 kV .....	105
<b>Figura 72</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 70 kV.....	106
<b>Figura 73</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 80 kV.....	108
<b>Figura 74</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 80 kV.....	108
<b>Figura 75</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 80 kV .....	109
<b>Figura 76</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 80 kV.....	110
<b>Figura 77</b> – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 90 kV.....	112
<b>Figura 78</b> – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 90 kV.....	112

- Figura 79** – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 90 kV ..... 113
- Figura 80** – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 90 kV..... 113

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	– Amostras estudadas no trabalho e suas composições químicas .....	39
<b>Tabela 2</b>	– Valores calculados para as amostras com seus respectivos erros .....	41
<b>Tabela 3</b>	– Números atômicos efetivos calculados para as amostras.....	42
<b>Tabela 4</b>	- parâmetros de medidas utilizados.....	47
<b>Tabela 5</b>	– Comparação dos tons de cinza calculados para as duas formas de aquisição de dados no microtomógrafo (80kV) .....	50
<b>Tabela 6</b>	– Comparação entre os tons de cinza calculados utilizando um parâmetro de reconstrução para todas as amostras e os tons de cinza calculados para as reconstruções feitas individualmente (80 kV).....	52
<b>Tabela 7</b>	- Médias dos tons de cinza para as amostras, densidade e números atômicos efetivos utilizando como base a ardósia (100 kV).....	54
<b>Tabela 8</b>	– Médias dos tons de cinza para as amostras, densidade e números atômicos efetivos utilizando como base a fluorita (100 kV).....	56
<b>Tabela 9</b>	– Média dos tons de cinza para as amostras, densidade e números atômicos efetivos utilizando como base a hematita (100 kV).....	59
<b>Tabela 10</b>	– Coeficientes de determinação obtidos pelos ajustes lineares utilizando diferentes amostras-bases .....	60
<b>Tabela 11</b>	- Tons de cinza calculados para a fluorita em diferentes tensões e usando diferentes parâmetros de reconstrução .....	61
<b>Tabela 12</b>	– Valores de contraste obtidos em fatias de fluorita nas energias de 50, 80 e 100 kV .....	63
<b>Tabela 13</b>	– Equações de ajustes lineares para a densidade e número Atômico Efetivo para a validação da técnica.....	70
<b>Tabela 14</b>	– Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (100 kV) .....	71
<b>Tabela 15</b>	– Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 100kV .....	74

<b>Tabela 16</b> - Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (50, 60, 70, 80, 90 e 100 kV) .....	75
<b>Tabela 17</b> – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para as energias estudadas .....	78
<b>Tabela 18</b> – Médias dos tons de cinza para as amostras com amazonita e gabro (80kV) .....	80
<b>Tabela 19</b> – Composição química das amostras amazonita e gabro.....	82
<b>Tabela 20</b> – Comparação entre os resultados obtidos e os resultados encontrados pelo ajuste linear para o caso da amazonita e gabro (80kV) .....	83
<b>Tabela 21</b> – Médias dos tons de cinza para as amostras com arenito e sodalita nas energias de 80 e 100 kV .....	85
<b>Tabela 22</b> – Composição química das amostras arenito e sodalita .....	87
<b>Tabela 23</b> – Comparação entre os resultados obtidos e os resultados encontrados pelo ajuste linear para o caso do arenito e da sodalita (100kV) .....	88
<b>Tabela 24</b> – Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (50 kV) .....	96
<b>Tabela 25</b> – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 50kV .....	99
<b>Tabela 26</b> – Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (60 kV) .....	100
<b>Tabela 27</b> – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 60kV.....	103
<b>Tabela 28</b> – Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (70 kV) .....	103
<b>Tabela 29</b> – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 70kV.....	106
<b>Tabela 30</b> – Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (80 kV) .....	107
<b>Tabela 31</b> – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 80kV.....	110
<b>Tabela 32</b> – Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (90 kV) .....	111

<b>Tabela 33</b> – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 90kV .....	114
---	-----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	14
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
3.1	RAIOS X .....	16
3.2	INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA.....	17
3.2.1	Efeito Fotoelétrico .....	17
3.2.2	Efeito Compton .....	19
3.2.3	Espalhamento Rayleigh .....	20
3.2.4	Espalhamento Thomson .....	21
3.3	COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO.....	22
3.3.1	Coeficiente de Atenuação Linear e de Massa.....	23
3.4	MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X.....	25
3.4.1	História da Tomografia Computadorizada de Raios X.....	26
3.4.2	Aquisição dos Dados .....	29
3.4.3	Caracterização Geométrica .....	30
3.4.4	Resolução de Imagens .....	30
3.4.5	Algoritmo de Reconstrução de Imagens .....	31
3.4.6	Principais Artefatos em Microtomografia .....	37
3.4.6.1	Beam Hardening .....	37
3.4.6.2	Ring Artifact .....	38
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	39
4.1	AMOSTRAS .....	39
4.2	CÁLCULO DA DENSIDADE .....	40
4.3	CÁLCULO DO NÚMERO ATÔMICO EFETIVO .....	41
4.4	SISTEMA MICROTOMOGRÁFICO SKYSCAN 1172 .....	42
4.5	PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO.....	45
4.6	SOFTWARES UTILIZADOS .....	47
4.6.1	Software SkyScan 1172.....	47
4.6.2	Software NRecon.....	48

4.6.3	Software Imago.....	48
4.7	AQUISIÇÕES DOS DADOS .....	49
4.7.1	Formas de Obtenção dos Dados .....	49
4.8	MÉTODOS DE RECONSTRUÇÃO.....	51
4.8.1	Escolha dos Parâmetros de Reconstrução .....	51
4.8.2	Escolha da Amostra-base.....	53
4.8.3	Escolha da Energia-base.....	61
4.8.4	Artefatos Presentes nas Imagens Reconstruídas .....	64
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>66</b>
5.1	PRÉ-VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA .....	68
5.2	TENSÃO DE 100 kV .....	71
5.3	TODAS AS TENSÕES .....	75
5.4	APLICAÇÕES DA METODOLOGIA .....	78
5.4.1	Amazonita e Gabro .....	79
5.4.2	Arenito e Sodalita.....	83
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>90</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>95</b>
	<b>APÊNDICE A - TENSÃO DE 50 kV .....</b>	<b>96</b>
	<b>APÊNDICE B - TENSÃO DE 60 kV .....</b>	<b>100</b>
	<b>APÊNDICE C - TENSÃO DE 70 kV .....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE D - TENSÃO DE 80 kV .....</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE E - TENSÃO DE 90 kV.....</b>	<b>111</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O petróleo é ainda uma das fontes mais importantes de energia, além de ser a matéria-prima de vários produtos como: benzinhas, óleo diesel, gasolina e polímeros plásticos. Sua composição é à base de hidrocarbonetos derivados de transformações sofridas pela matéria orgânica por processos geológicos durante a formação de rochas sedimentares. Rochas sedimentares são formadas a partir do acúmulo de produtos do intemperismo sofrido por qualquer tipo de rocha e da deposição de materiais provenientes das atividades minerais e vegetais. Os hidrocarbonetos ocupam espaços porosos nas rochas, sendo esses espaços poros ou fraturas.

Para que haja uma maior eficiência na extração do petróleo das rochas é necessário obter informações acerca de sua estrutura interna. Dentre essas informações estão a porosidade, o tamanho do poro e a permeabilidade <sup>[1]</sup>. Outra informação importante é sobre sua composição interna, que pode fornecer informações a respeito do processo geológico de formação da rocha. Essas informações podem ser medidas por metodologias invasivas que não permitem uma reutilização da amostra e, com isso, a medida de outro parâmetro na mesma amostra. Portanto, metodologias que possam fornecer informações sobre a amostra sem destruí-la acabam sendo mais utilizadas que as metodologias destrutivas. A microtomografia de raios X é uma metodologia não-invasiva que é capaz de fornecer essas informações sobre a estrutura interna de rochas. Nela, imagens da estrutura interna são geradas a partir da atenuação do feixe de raios X que atravessa a amostra. Essa metodologia foi empregada no estudo de rochas reservatório, com bons resultados <sup>[2-6]</sup>. Para a obtenção dessas imagens, alguns parâmetros devem ser escolhidos, como: tensão no tubo de raios X, corrente no tubo de raios X, resolução espacial da imagem, ângulo total de rotação da amostra, passo angular de rotação, tempo de medida de rotação, etc. A escolha da tensão está diretamente ligada à energia dos raios X produzidos que serão atenuados pela amostra. A escolha de apenas uma energia de raios X pode “mascarar” materiais com densidades e números atômicos próximos, fazendo com que eles fiquem

confundidos nas imagens. Isso acaba sendo um problema, pois não é possível determinar, com certo grau de certeza, a composição interna da amostra.

O objetivo desse trabalho será caracterizar rochas quanto a sua tonalidade média de cinza para uma determinada energia e relacioná-lo com as suas densidades e números atômicos efetivos.

O principal parâmetro que deve ser avaliado é o da energia dos raios X. Materiais com densidades e números atômicos efetivos semelhantes são, para algumas faixas de energia, igualmente atenuadores da radiação. Como a microtomografia está baseada na formação de imagens através da atenuação dos raios X, o software de reconstrução de imagens “entende” que dois materiais com densidades e números atômicos efetivos semelhantes são um mesmo material. Isso é mostrado através dos tons de cinza na imagem.

Portanto, variou-se a energia dos raios X que atravessam a amostra – a atenuação é dependente da energia incidente – e com base nessas atenuações diferentes, determinou-se o tom de cinza de cada amostra para cada energia e comparou-se com a sua densidade e o seu número atômico efetivo. Com isso, mostra-se possível caracterizar amostras quanto à sua tonalidade de cinza para uma dada energia, e com base em retas de calibração, é possível fazer um estudo quanto aos constituintes presentes em uma determinada amostra.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Há alguns trabalhos na literatura que utilizam a microtomografia para determinar os constituintes de amostras; os que existem, usam a técnica de dupla energia para tal (como descrito abaixo). Nenhum deles na linha proposta nesse trabalho.

M. Van Geet et al.<sup>[7]</sup> utilizaram a microtomografia para analisar rochas reservatórios, tal como um carbonato oolítico. Para isso usaram um microtomógrafo SkyScan 1072 e relacionaram a atenuação com a densidade e o número atômico efetivo. Com a técnica de dupla energia, fizeram cálculos e compararam a densidade e o número atômico medidos com as densidades e os números atômicos reais, obtendo um bom ajuste linear.

K. Remeysen e R. Swennen<sup>[8]</sup> estudaram rochas carbonáticas para caracterizar suas fases: dolomita, calcita e anidrita. Além disso, obtiveram uma distribuição de densidades e números atômicos efetivos em uma fatia 2D de uma amostra artificial, utilizando a técnica de dupla energia e depois aplicaram em amostras reais, obtendo um mapa de distribuição de seus constituintes. Para isso, utilizaram um microtomógrafo SkyScan 1072.

Mark F.V. Tarplee e Nick Corps<sup>[9]</sup> estudaram as melhores formas de se obter imagens microtomográficas utilizando um microtomógrafo SkyScan 1072. Eles analisaram os problemas inerentes à técnica (beam hardening), desalinhamento e a desfocagem das imagens. Também estudaram as formas de se maximizar o contraste das imagens, além de acertar parâmetros como “frames”, passo angular, para obter uma ótima imagem CT.

D. Koroteev et al.<sup>[10]</sup>, utilizando um microtomógrafo SkyScan 1172, fizeram um mapeamento 3D de pós sintéticos multiminerais (Quartzo, Halita e Calcita). Eles mostraram que a técnica juntamente com um algoritmo apropriado e o conhecimento da composição mineral permite fazer uma distribuição de constituintes dentro da rocha.

A. Nadeev et al.<sup>[11]</sup> utilizaram um microtomógrafo SkyScan 1172 para distinguir fases dentro de uma amostra, visto que, os materiais que normalmente estão dentro das rochas (óleo, água, argila, etc) não dão um bom contraste nas imagens. Eles utilizaram agentes de contraste, como nitrato de chumbo, soluções de bário, estrôncio, etc, para mostrar que eles ajudam a distinguir fases dentro da amostra.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 RAIOS X

Uma das descobertas mais importantes do século XIX foi a dos raios X, feita por Wilhelm C. Roentger em 1895. Em seus estudos com tubos de raios catódicos submetidos a altas voltagens, Roentgen verificou que algo diferente dos raios catódicos saía do tubo e causava fluorescência em cristais de cianeto de bário. Verificou também que mesmo colocando objetos na frente, essa fluorescência não cessava. Não sabendo a origem e a natureza desse tipo de radiação, denominou-a raios X. Esse tipo de radiação é capaz de impressionar chapas fotográficas, viaja em linha reta e não são influenciadas por campos eletromagnéticos.

O tubo para a produção de raios X, desenvolvido por Coolidge e usado até hoje, consiste de um tubo de vidro, onde se encontram o catodo e o anodo a vácuo. O catodo é um filamento de tungstênio que ao ser aquecido emite elétrons por efeito termiônico. O anodo é feito de tungstênio, prata ou molibdênio já que esses materiais possuem alto ponto de fusão e número atômico elevado, sendo, portanto, mais eficientes na produção dos raios X.

Ao aquecer o filamento e aplicar uma alta tensão entre o anodo e catodo, elétrons são acelerados para o anodo. Ao chegarem ao anodo podem ocorrer dois fenômenos: o primeiro é o freamento desses elétrons causando a emissão de um espectro contínuo de energia, também conhecido, nesse caso, como radiação de “bremsstrahlung”; o segundo é a interação dos elétrons, que chegam ao anodo, com os elétrons da eletrosfera dos átomos que compõe o anodo, produzindo fluorescência de raios X (figura 1).

Raios X são ondas eletromagnéticas com energia na faixa de alguns eV (elétron-volt) até algumas centenas de keV e podem interagir com a matéria através dos efeitos fotoelétrico, Compton e espalhamentos Rayleigh e Thomson, na faixa de energia considerada nesse trabalho.

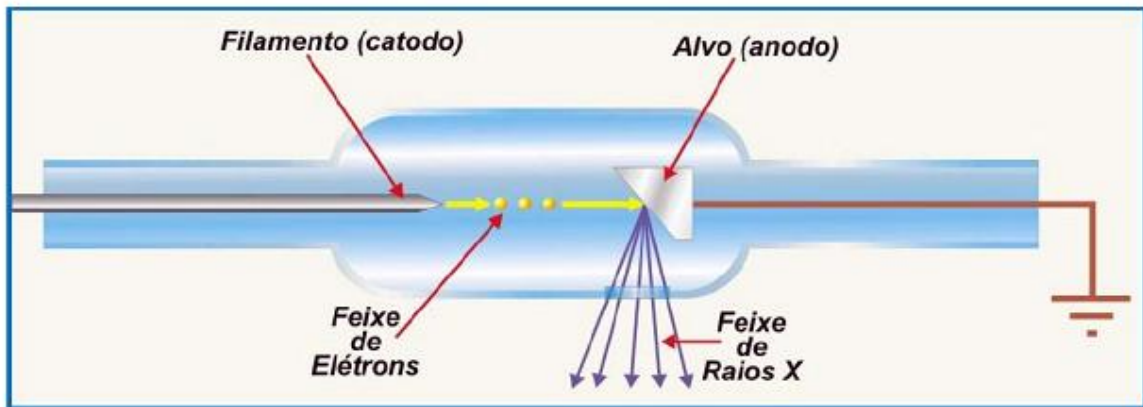


Figura 1– Esquema de um tubo de Coolidge para a produção de raios X <sup>[12]</sup>.

### 3.2 INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Na faixa de energia dos raios X, a matéria pode interagir com a radiação eletromagnética através dos fenômenos: efeitos fotoelétrico e Compton e espalhamentos Rayleigh e Thomson. Esses fenômenos são tratados nos itens a seguir.

#### 3.2.1 Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico, proposto por Einstein, ocorre quando a energia de um fóton é totalmente absorvida por um elétron do átomo, ocasionando sua ejeção. A energia cinética com que o elétron sai é dada por:

$$T = h\nu - E_K \quad (1)$$

onde  $T$  é a energia cinética do elétron ejetado,  $h\nu$  a energia do fóton incidente e  $E_K$  a energia de ligação do elétron na camada  $K$  <sup>[13]</sup>. A figura 2 ilustra o efeito fotoelétrico.

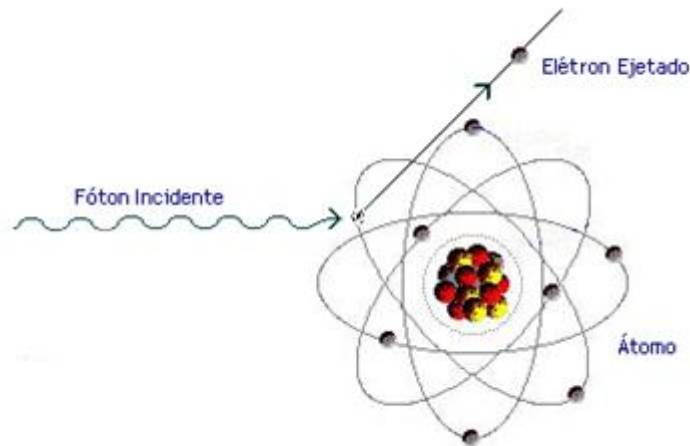


Figura 2 - Efeito Fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico ocorre principalmente com elétrons da camada  $K$  da eletrosfera atômica (os elétrons mais ligados ao átomo têm maior probabilidade de absorção total do fóton). A ejeção de um elétron causa um rearranjo eletrônico na eletrosfera que ocasiona a emissão de um raio X ou de um elétron Auger, via interação de campo.

A seção de choque para o efeito fotoelétrico ( $\text{cm}^2/\text{átomo}$ ), na camada  $K$ , é dado por<sup>[14]</sup>:

$$\tau_K = \varphi_0 Z^5 \alpha^4 2^{\frac{5}{2}} \left( \frac{mc^2}{h\nu} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (2)$$

onde  $\tau_K$  é a seção de choque da absorção fotoelétrica para a camada  $K$ ;  $\varphi_0 = 2,67\pi r_0^2$ ;  $r_0 = \frac{e^2}{mc^2}$  é o raio clássico do elétron;  $\alpha$  é a constante de estrutura fina ( $\alpha = \frac{1}{137} = \frac{2\pi e^2}{hc}$ );  $mc^2$  é a energia de repouso do elétron e  $h\nu$  é a energia do fóton incidente. Nele, a seção de choque depende do número atômico elevado à quinta potência. Portanto, quanto mais elementos com elevados números atômicos houver numa amostra, maior será sua seção de choque para o efeito fotoelétrico e, conseqüentemente, maior será a predominância desse efeito.

### 3.2.2 Efeito Compton

O efeito Compton é o espalhamento inelástico dos fótons com a matéria. Se a energia do fóton incidente é muito maior que a energia de ligação do elétron ao átomo, podemos considerar o elétron livre. Nesse efeito parte da energia do fóton incidente é absorvida pelo elétron, que é ejetado com certa energia cinética, e o restante é emitido como outro fóton, que possui energia menor <sup>[13]</sup>. A figura 3 mostra o esquema do efeito Compton.

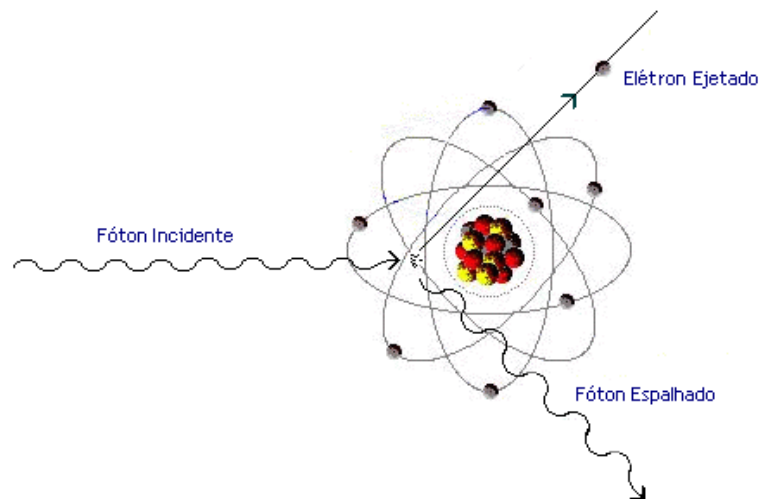


Figura 3 - Efeito Compton.

As energias dos fótons incidente e espalhado são representadas como:

$$E = h\nu \quad (3)$$

$$E' = \frac{E}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

onde  $E$  é a energia do fóton incidente;  $E'$  é a energia do fóton espalhado, e  $\alpha = hv/m_0c^2$ .

A equação (5) mostra a seção de choque total ( $\text{cm}^2/\text{átomo}$ ) do espalhamento Compton, onde se pode notar que a dependência do número atômico  $Z$  é linear <sup>[14]</sup>.

$$\sigma_c = 2Z\pi r_0^2 \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1+2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\} \quad (5)$$

onde  $\alpha = \frac{hv}{mc^2}$ ,  $hv$  é a energia do fóton incidente,  $m$  é a massa do elétron,  $r_0 = \frac{e^2}{mc^2}$  e  $Z$  é o número atômico.

### 3.2.3 Espalhamento Rayleigh

O espalhamento elástico, também conhecido como coerente, é o processo em que o fóton incidente sofre apenas um desvio da sua trajetória inicial ao interagir com o campo dos elétrons ligados (figura 4). Neste processo, todos os elétrons no átomo participam de maneira coerente. Há apenas uma mudança no momento linear do fóton, mas sua energia inicial é conservada <sup>[13]</sup>.

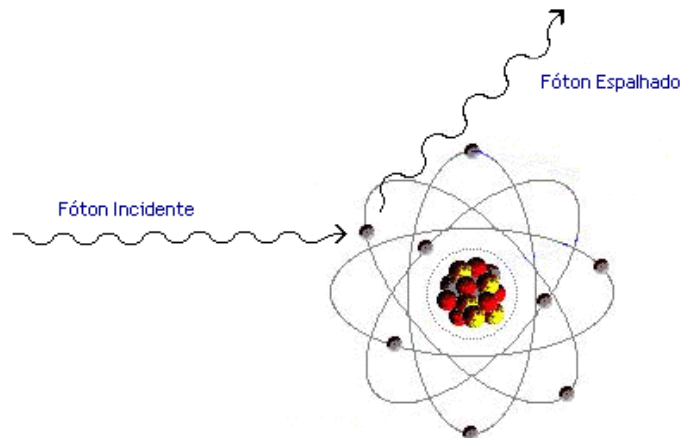


Figura 4 - Espalhamento Rayleigh.

A equação (7) mostra a dependência da seção de choque ( $\text{cm}^2/\text{átomo}$ ) com o número atômico <sup>[14]</sup>.

$$d\sigma_R = r_0 |f_\theta|^2 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} d\Omega \quad (6)$$

onde  $f_\theta$  é o fator de espalhamento atômico;  $d\Omega$  é o ângulo sólido na direção de  $\theta$ . Para comprimento de onda ( $\lambda$ ) grande,  $f_\theta \rightarrow Z$ , ou seja, há uma dependência quadrática com o número atômico.

### 3.2.4 Espalhamento Thomson

O espalhamento Thomson ocorre quando um fóton interage com o campo dos elétrons do material fazendo estes oscilarem (figura 5). Esta oscilação irradia uma nova onda na mesma fase e frequência da onda da radiação incidente. A energia inicial do fóton é conservada com mudança no seu momento linear <sup>[15]</sup>.

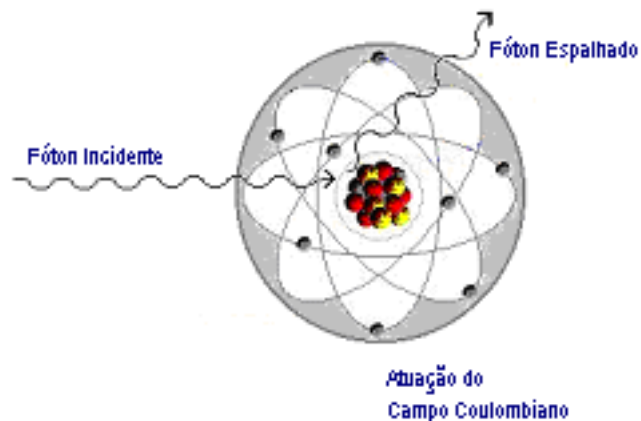


Figura 5 - Espalhamento Thomson.

A seção de choque ( $\text{cm}^2/\text{átomo}$ ) do espalhamento Thomson é dada pela equação (7)<sup>[14]</sup>.

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_0^2 \quad (7)$$

onde:  $r_0 = e^2/mc^2$ .

### 3.3 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO

Os efeitos fotoelétrico e Compton e os espalhamentos Rayleigh e Thomson descritos possuem, cada um, uma determinada seção de choque, que fornece a probabilidade de interação do fóton com a matéria para aquele fenômeno. Então para calcular a probabilidade total de interação do fóton de raio X com a matéria, deve-se somar todas as probabilidades de interação, ou seja, somar todas as seções de choque:

$$\sigma = \tau_K + \sigma_R + \sigma_T + Z\sigma_C \quad (8)$$

onde  $\tau_K$  é a seção de choque para o efeito fotoelétrico,  $\sigma_R$  para o espalhamento Rayleigh,  $\sigma_T$  para o Thomson,  $\sigma_C$  para o Compton e  $Z$  é o número atômico do material. A seção de choque Compton é multiplicada por  $Z$  para levar em conta todos os elétrons do átomo. Multiplicando a equação 9 pela densidade de átomos ( $\text{átomos}/\text{m}^3$ ),  $N$ , obtém-se a probabilidade de interação por unidade de comprimento<sup>[13]</sup>, ou seja:

$$\mu = N(\tau_K + \sigma_R + \sigma_T) + NZ\sigma_C \quad (9)$$

A probabilidade fornecida pela equação 10 é conhecida como o coeficiente de atenuação linear e é o inverso do livre caminho médio de um fóton <sup>[13]</sup>.

### 3.3.1 Coeficiente de Atenuação Linear e de Massa

Ao passar por um material de espessura  $x$ , o feixe de raios X interage com ele pelos processos explicados no item anterior, cada um com sua probabilidade de ocorrência. Porém, uma parte da radiação atravessa o material sem interagir. A fração dessa radiação que não interage em relação à radiação incidente é dada pela equação <sup>[16]</sup>:

$$I = I_0 e^{-\mu'x} \quad (10)$$

onde  $I$  é a intensidade (contagens/s) da radiação que atravessa o material sem interação;  $I_0$  é a intensidade da radiação incidente;  $\mu'$  é o coeficiente de atenuação linear ( $\text{cm}^{-1}$ ) e  $x$  é a espessura da amostra. O coeficiente de atenuação linear pode ser escrito como:

$$\mu' = \mu\rho \quad (11)$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de atenuação de massa ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) e  $\rho$  é a densidade volumétrica da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

A figura 6 ilustra a lei de atenuação da radiação para uma amostra de um mesmo material e homogêneo usando radiação monocromática. A figura 7 para um material não homogêneo e radiação monocromática e a figura 8 para um material não homogêneo e radiação policromática <sup>[17]</sup>.

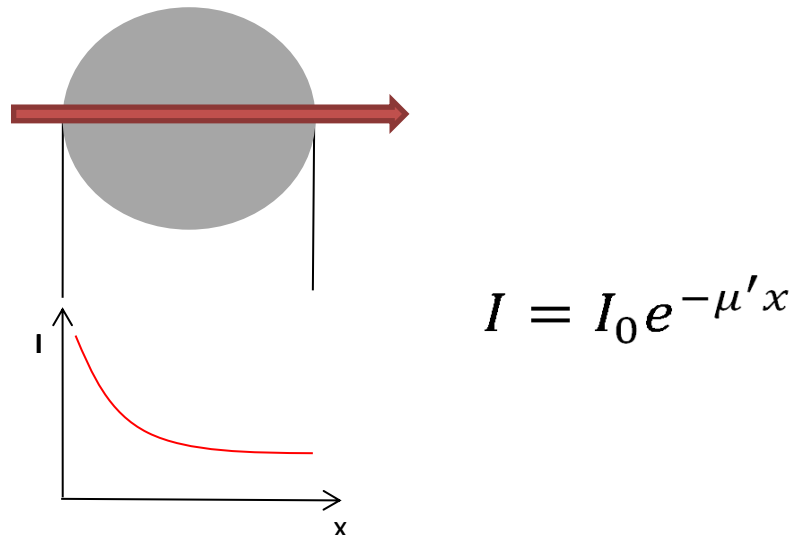


Figura 6 – Transmissão de raios X para uma amostra homogênea, usando uma radiação monocromática<sup>[17]</sup>.

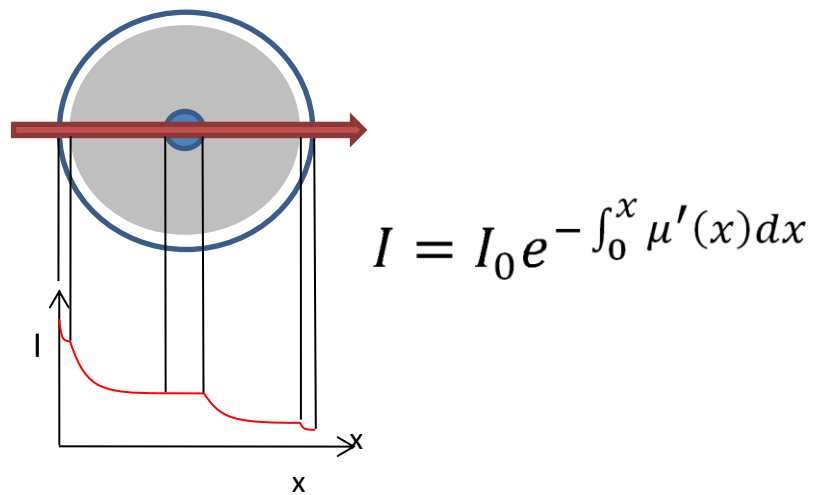


Figura 7 – Transmissão de raios X para uma amostra não-homogênea, usando uma radiação monocromática<sup>[17]</sup>.

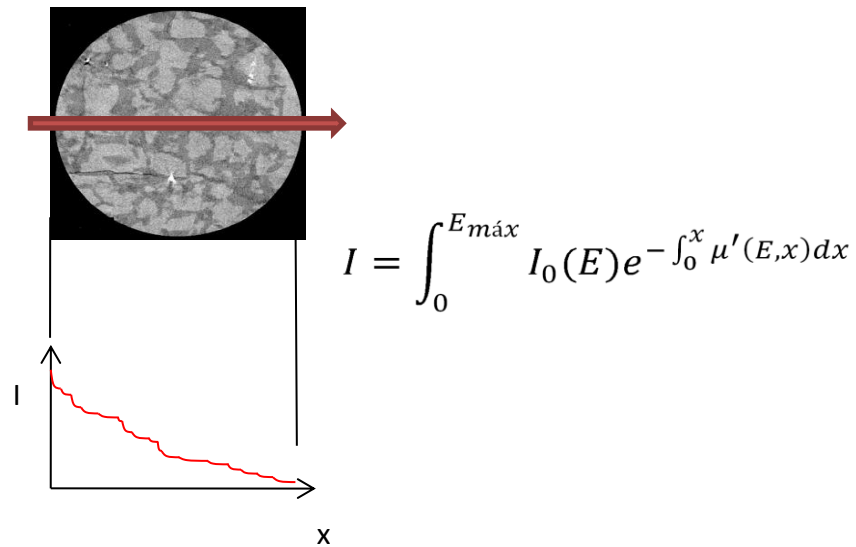


Figura 8 – Transmissão de raios X para uma amostra não-homogênea, usando uma radiação policromática<sup>[17]</sup>.

### 3.4 MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X

A microtomografia computadorizada de raios X ( $\mu$ CT) é uma técnica não destrutiva capaz de fornecer imagens da região interna de objetos. Para isso, baseia-se no mapeamento da atenuação sofrida pela radiação incidente ao atravessar o material (a radiação incidente na amostra pode vir de um tubo convencional de raios X ou de radiação síncrotron). A radiação que não é atenuada pelo material é detectada em uma câmara CCD (*charge-coupled devices*).

Após obter várias projeções da amostra (para isso, rotaciona-se a amostra), algoritmos de reconstrução fornecem imagens das seções 2D da mesma. O empilhamento das seções 2D fornecem uma imagem 3D da amostra.

A análise das imagens 2D fornecem informações da estrutura do material em uma determinada fatia, tal como as regiões porosas, enquanto que a 3D possui as mesmas características da amostra. As análises dessas seções 2D e 3D dependem de softwares adequados para o tratamento das imagens.

### 3.4.1 História da Tomografia Computadorizada de Raios X

O sistema tomográfico foi desenvolvido na década de 60 para auxiliar em diagnósticos médicos. Seu desenvolvimento se deu na melhoria das imagens obtidas e na diminuição de exposição do paciente à radiação.

Nos tomógrafos de primeira geração um detector media a atenuação sofrida pelo feixe colimado ao passar pelo material. O conjunto fonte-detector era então transladado horizontalmente para uma nova medida. Essa operação era repetida até que todo o material tivesse sido percorrido horizontalmente. Após isso ocorrer, o sistema fonte-detector era rotacionado em um grau e as medidas horizontais começavam novamente. Depois de completar  $180^\circ$  ou  $360^\circ$  de rotação o sistema se movimentava verticalmente para que outra fatia fosse medida. A figura 9 mostra como se realiza uma medida nesse tomógrafo.

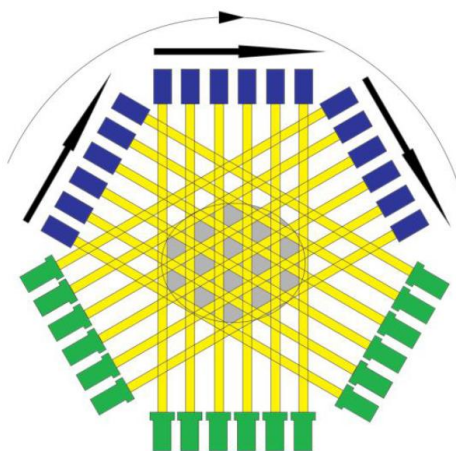


Figura 9– Medida com um tomógrafo de primeira geração<sup>[18]</sup>.

Nos tomógrafos de segunda geração, o feixe da radiação não é mais colimado, sendo agora em forma de leque (com uma abertura de  $3^\circ$  a  $10^\circ$ ). Com isso, um número maior de detectores começou a ser utilizado. O ângulo no qual o sistema era rotacionado era o mesmo do ângulo de abertura do feixe e o processo de translação era o mesmo. A figura 10 ilustra uma medida nesse tipo de tomógrafo.

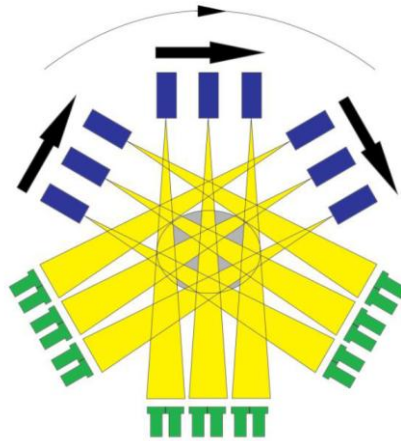


Figura 10 – Medida com um tomógrafo de segunda geração<sup>[18]</sup>.

Nos tomógrafos de terceira geração, o ângulo de abertura do feixe é suficiente para cobrir todo material (o que necessita de mais detectores do outro lado), eliminando a necessidade de transladar o sistema. A figura 11 ilustra uma medida nesse tipo de tomógrafo.

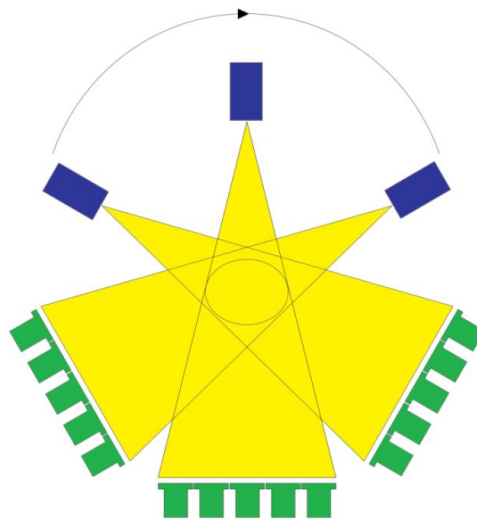


Figura 11 – Medida com um tomógrafo de terceira geração<sup>[18]</sup>.

A quarta geração de tomógrafos consiste em um anel de detectores fixos. Em seu interior se localiza a fonte de raios X. Nesse caso, apenas a fonte, cuja abertura

do feixe cobre todo material, é rotacionada. A figura 12 ilustra uma situação de medida.

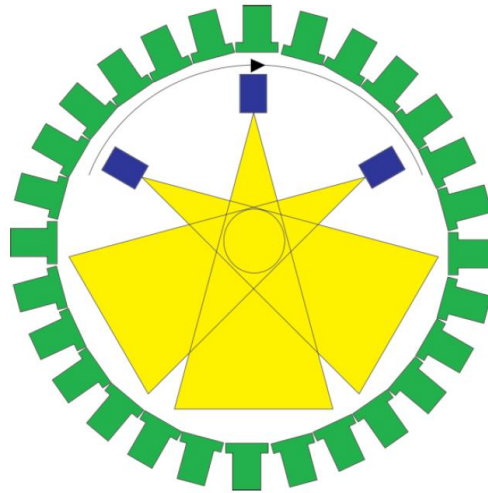


Figura 12 – Medida com um tomógrafo de quarta geração<sup>[18]</sup>.

Na quinta geração de tomógrafos não há partes móveis. A fonte de raios X é substituída por quatro alvos em forma de anel ( $\sim 210^\circ$ ). Esses alvos são atingidos por um feixe de elétrons. Esse feixe faz uma varredura e incide em um ponto de um anel de tungstênio. A desaceleração abrupta dos elétrons produz raios X, que após atravessar o objeto, são detectados em detectores de estado sólido.

A sexta geração dos tomógrafos permite imagens tridimensionais através de um sistema helicoidal. Aqui, o objeto translada enquanto o sistema fonte-detector o circula. Os softwares utilizados nessa geração de tomógrafos devem ser alterados para levarem em conta o traçado helicoidal da aquisição de dados.

### 3.4.2 Aquisição dos Dados

Na microtomografia, a aquisição dos dados é feita por uma câmara CCD (*Charge Coupled Device*). Ela é formada por um conjunto de sensores, dispostos em uma matriz de linhas e colunas.

Como as câmaras CCDs são sensíveis à luz, há a necessidade do uso de cintiladores. Os cintiladores convertem os raios X em luz visível e estas chegam aos sensores da câmara CCD. Lá a luz é convertida em um sinal de corrente – a intensidade do sinal é proporcional à intensidade da luz que incide no sensor. A corrente produz um sinal analógico que será ampliado e convertido em um sinal digital. Esse sinal é então gravado no computador em valores de tons de cinza – variam de 0 a 255. A figura 13 mostra uma representação do sistema de aquisição de dados.

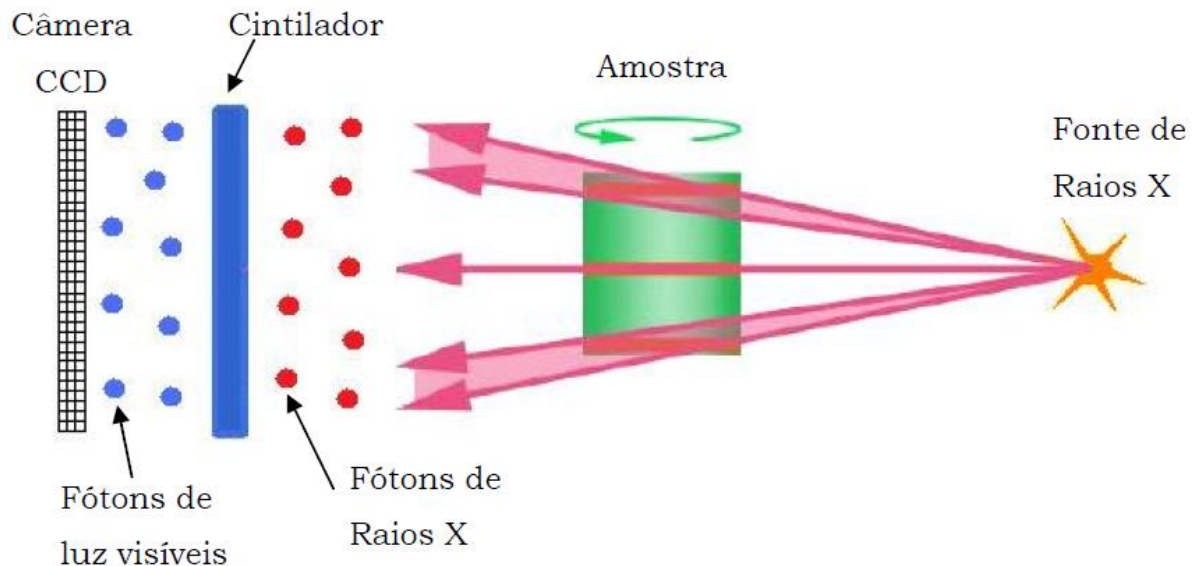


Figura 13 – Representação do sistema de aquisição de dados da câmara CCD <sup>[19]</sup>.

### 3.4.3 Caracterização Geométrica

Uma imagem digital é caracterizada pelos seus pixels, se for uma imagem 2D, ou pelo seus voxels, se for 3D. O pixel é a menor elemento de área numa imagem 2D, como o voxel é o menor elemento de volume numa imagem 3D. As dimensões de cada pixel são definidas pela resolução espacial utilizada. Numa imagem tomográfica, os pixels são representados por tons de cinza, que representam o valor da atenuação do feixe naquele ponto. A figura 14 mostra uma representação desses dois elementos.

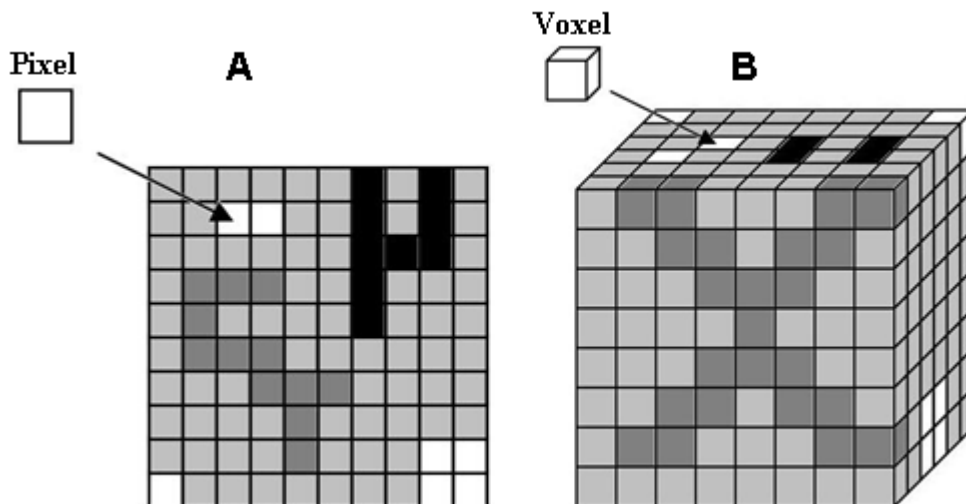


Figura 14 - (A) Imagem bidimensional formada por elementos de área e (B) Imagem tridimensional caracterizada por elementos de volume<sup>[20]</sup>.

### 3.4.4 Resolução de Imagens

A resolução espacial de uma imagem mostra qual o menor elemento que pode ser analisado pelo conjunto do sistema de medida e pelo software de análise. Se a resolução de uma imagem, por exemplo, for de 10  $\mu\text{m}$ , elementos de matéria ou poro menores que esse valor não serão identificados pelo software.

Hoje, há tomógrafos que conseguem chegar a resoluções de imagens da ordem de nanômetros. A resolução máxima que um equipamento pode atingir, em uma medida microtomográfica, vai depender do tamanho da amostra, geometria e qualidade do sistema irradiação/detecção.

A resolução de uma imagem microtomográfica depende do tamanho do pixel no detector ( $x$ ) e de um fator – chamado fator de magnificação ( $M$ ):

$$R = \frac{x}{M} \quad (12)$$

sendo

$$M = \frac{a + b}{a} \quad (13)$$

onde  $a$  é a distância fonte-amostra e  $b$  é distância amostra-câmera CCD.

Há ainda outro parâmetro importante que é a resolução de contraste. Esse parâmetro relaciona-se com o contraste mínimo entre os coeficientes de atenuação entre duas partes adjacentes da amostra; quanto maior a resolução de contraste, melhor será quantificada pequenas variações na densidade dentro da amostra. Esse parâmetro é dependente da radiação incidente. Se a energia da radiação for muito alta, partes da amostra podem se tornar transparentes a ela; se for muito baixa há uma maior interação com a matéria, tornando a amostra, como um todo, um bom absorvedor – ambos os casos diminui a resolução de contraste. Outra relação é quanto à intensidade do feixe. Quanto mais intenso ele for, maior será o número de fótons, e conseqüentemente, devido à diminuição dos desvios estatísticos, uma melhor resolução de contraste.

### 3.4.5 Algoritmo de Reconstrução de Imagens

O algoritmo envolvido na obtenção das imagens é o de Retroprojeção Filtrada<sup>[21]</sup>. O valor medido da atenuação de um feixe de radiação (ou uma projeção)

é associado a todos os elementos ao longo do feixe. A sobreposição de retroprojeções feitas em diferentes ângulos  $\theta$  fará com que se crie um contraste entre elementos de coeficientes de atenuação diferentes. Por isso, quanto maior for o número de projeções, mais nítida será a imagem.

Nele, é obtida uma solução aproximada que leva em conta que a atenuação do feixe é uniforme sobre todo trajeto dos raios X na amostra, sendo, portanto, a atenuação calculada proporcional à atenuação medida.

Considerando o feixe como uma linha que atravessa a amostra, o objeto é modelado a partir de uma distribuição da atenuação dos raios X ao longo desta linha, a integral sobre ela representa a atenuação total sofrida pelo feixe que atravessa o objeto.

A projeção é formada pela combinação de um arranjo de integrais de linha de uma coleção de raios paralelos denotada por  $P_{\theta}(t)$  para um  $\theta$  constante, como se pode observar na figura 15.

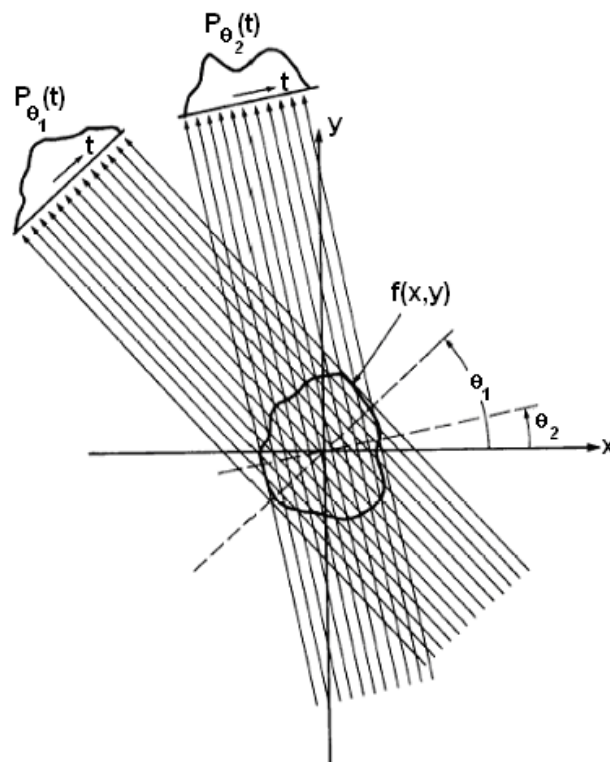


Figura 15 - Projeções paralelas dadas pelo arranjo de raios paralelos para diferentes ângulos<sup>[22]</sup>.

onde:

$$P_{\theta}(t) = \int_{(\theta,t)} f(x,y) ds \quad (14)$$

onde  $f(x,y)$  é uma função bidimensional das integrais de linha dos parâmetros  $\theta$  e  $t$ . Para uma rotação de  $180^\circ$ , o algoritmo usa a equação:

$$f(x,y) = \int_0^{\pi} Q_{\theta}(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta \quad (15)$$

onde:

$$Q_{\theta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(w) |w| e^{j2\pi w t} dw \quad (16)$$

$S_{\theta}(w)$  é uma transformada unidimensional de Fourier da projeção  $P_{\theta}(t)$ <sup>[22]</sup>.

O tomógrafo utilizado nesse trabalho não utiliza feixes paralelos de raios X, mas sim, um feixe cônico<sup>[22]</sup>. A figura 16 mostra um exemplo em que os detectores são moldados em forma de arco, fazendo com que a radiação incida com espaçamentos iguais dados por D. Já a figura 17, mostra detectores em um arranjo plano, mostrando que as linhas de radiação não chegam aos detectores com espaçamentos iguais. Assim, a função  $f(x,y)$  não pode ser utilizada da maneira que foi expressa na equação 16. Para radiação de feixe cônico a função tem que ser expressa em coordenadas polares:

$$x = r \cos \phi \quad y = r \sin \phi \quad (17)$$

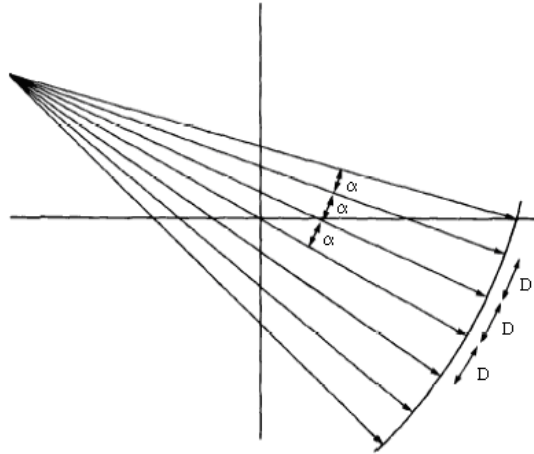


Figura 16 - Arranjo tomográfico com detectores alinhados na forma de um semicírculo<sup>[22]</sup>.

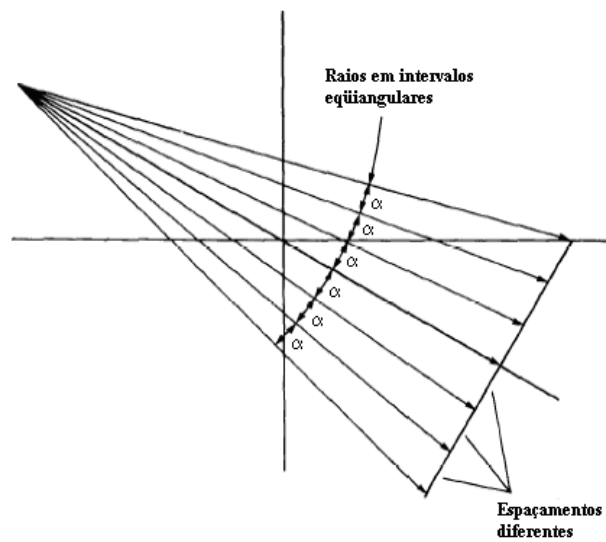


Figura 17 - Arranjo tomográfico com mesmo ângulo entre as linhas de radiação incidente e com espaçamentos diferentes de chegada aos detectores<sup>[22]</sup>.

Considere o esquema mostrado na figura 18, com dois detectores imaginários  $D'_1$  e  $D'_2$ , passando pela origem, e as seguintes transformações<sup>[22]</sup>:



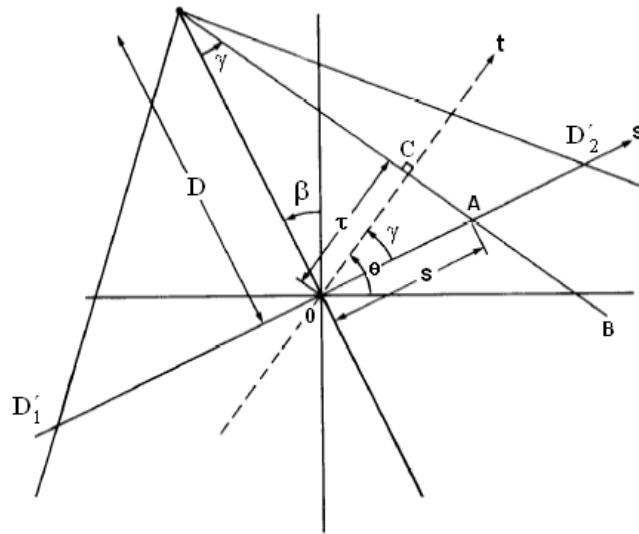


Figura 19 - Parâmetros usados no algoritmo de reconstrução de imagem<sup>[22]</sup>.

A função  $f(r, \phi)$ , juntamente com os parâmetros descritos anteriormente, com o esquema mostrado na figura 19 e algumas transformações matemáticas, pode ser escrita como<sup>[22]</sup>:

$$f(r, \phi) = \frac{1}{2} \int_{-\tan^{-1}(\frac{S_m}{D})}^{2\pi - \tan^{-1}(\frac{S_m}{D})} \int_{-S_m}^{S_m} P_{\beta+\gamma} \left( \frac{sD}{\sqrt{D^2 + s^2}} \right) \cdot h[r \cos(\beta + \tan^{-1}(\frac{s}{D}) - \phi)] \frac{D^3}{(D^2 + s^2)^2} ds d\beta \quad (19)$$

onde  $S_m$  é o maior valor de  $s$  em cada projeção que corresponde a  $t_m$  em projeções paralelas e a expressão  $P_{\beta+\gamma} \left( \frac{sD}{\sqrt{D^2 + s^2}} \right)$  corresponde à integral do raio  $\overline{SA}$  na projeção paralela  $P_\theta(t)$ .

### 3.4.6 Principais Artefatos em Microtomografia

#### 3.4.6.1 Beam Hardening

Um artefato que é encontrado em imagens microtomográficas é o *beam hardening*, ou endurecimento do feixe. Na maioria dos microtomógrafos é utilizada uma fonte policromada de raios X. Esse artefato ocorre devido à absorção de fótons de baixa energia pela borda da amostra. Com isso, o software “entende” que nas bordas há um material mais denso em relação ao interior da amostra. Nas imagens microtomográficas, o efeito é uma região mais escura no centro da amostra que vai se tornando mais clara à medida que se aproxima da sua borda<sup>[23]</sup>. Para diminuir os efeitos desse artefato, filtros físicos de metais são colocados na saída do tubo ou na frente da câmara CCD para absorver fótons de baixa energia. Também há a utilização de filtros via software para corrigi-lo. A utilização desse último ocasiona a mudança no tom de cinza da amostra. A figura 20 mostra um exemplo do aparecimento desse artefato em uma imagem microtomográfica.

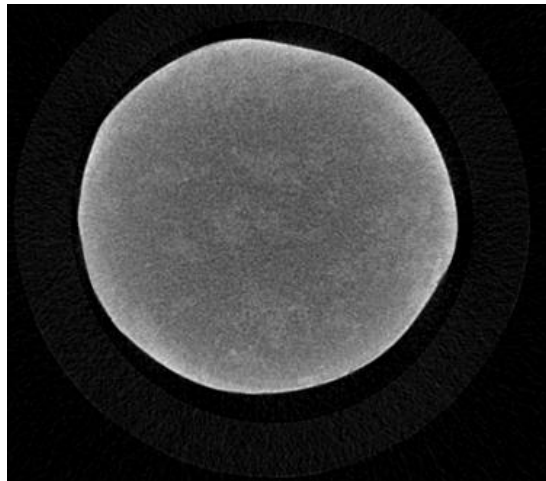


Figura 20 - Surgimento do artefato *beam hardening* em uma imagem microtomográfica.

### 3.4.6.2 Ring Artifact

Artefatos em anel (*ring artifacts*) surgem em tomógrafos de terceira geração em formas de círculos concêntricos ou círculos parciais. Ele ocorre devido ao fato que os detectores na câmara CCD não fornecem o mesmo sinal a um mesmo estímulo, resultando em valores anômalos de atenuação. A forma circular desse artefato ocorre pelo fato da amostra ser rotacionada. Se um detector não está funcionando corretamente, ele dá essa informação errada sempre que a amostra é rotacionada<sup>[21]</sup>. Esse artefato pode ser sanado através de filtros via software e também com a utilização do “random movement”. Um exemplo de imagem com esse artefato e a mesma imagem corrigida via software está mostrado na figura 21.

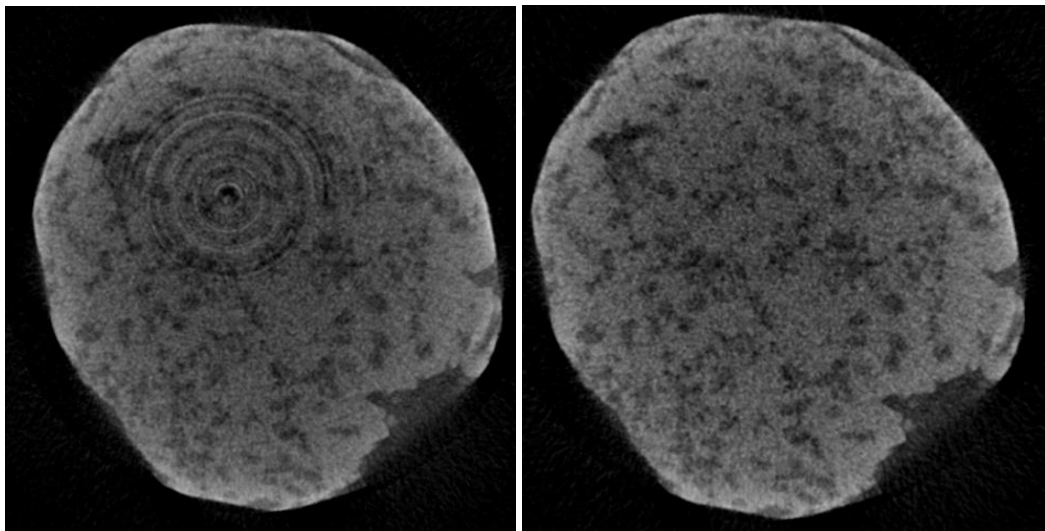


Figura 21 - Imagem com o artefato anel (à esquerda) e a mesma imagem corrigida via software (à direita).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 AMOSTRAS

Nesse trabalho foram utilizadas sete amostras: calcita, ardósia, alumínio, mármore branco, fluorita, hematita e galena. A tabela 1 mostra a composição química das amostras.

Tabela 1 – Amostras estudadas no trabalho e suas composições químicas.

Amostras	Composição Química
Calcita	$\text{CaCO}_3$
Ardósia	$\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$ (35%); $(\text{Mg,Al,Fe})_{12}(\text{Si, Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$ (20%); $\text{SiO}_2$ (35%).
Alumínio	Al
Mármore Branco	$\text{CaCO}_3$ (5%); $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (90%); $\text{SiO}_2$ ; $\text{FeS}_2$ ; $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ .
Fluorita	$\text{CaF}_2$
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Galena	PbS

As amostras foram moldadas em formato cilíndrico com 6 mm de diâmetro por 5 mm de altura e inseridas uma sobre a outra dentro de um cilindro de plástico. A figura 22 mostra as amostras.

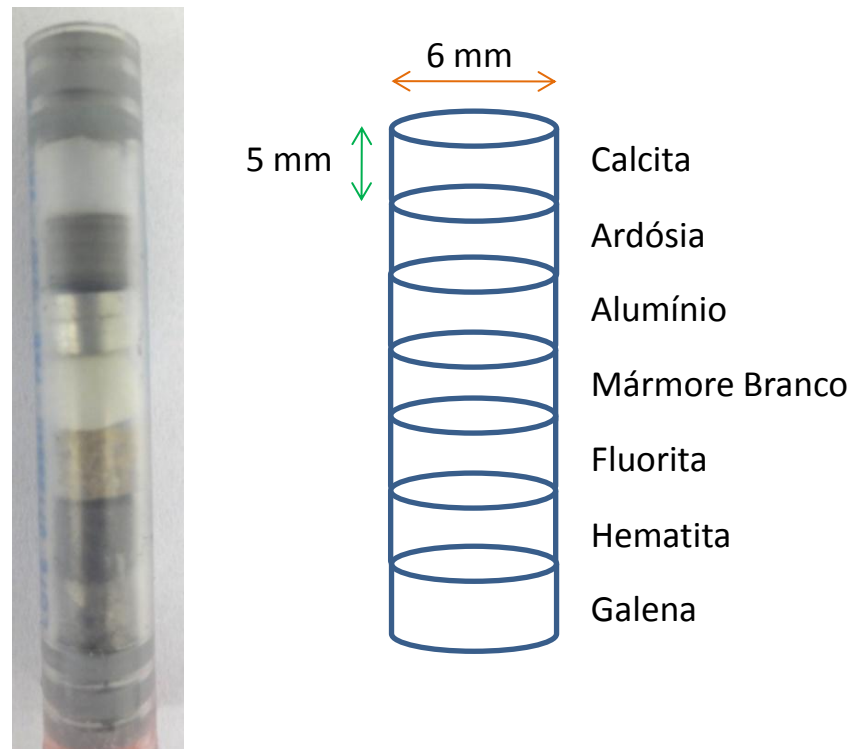


Figura 22 – Amostras dentro do suporte de plástico (esquerda) e um esquema da disposição das amostras dentro dele (direita).

## 4.2 CÁLCULO DA DENSIDADE

Para o cálculo da densidade das amostras, mediu-se a massa das amostras dez vezes com uma balança semi-analítica, GEHAKA BG400. Em seguida, mergulharam-se – dez vezes – as amostras em provetas graduadas contendo água, medindo, assim, o volume das amostras. As amostras estavam envolvidas em uma película plástica fina para evitar a absorção de água. Tanto a massa do filme plástico

quanto seu volume são desprezíveis quando comparados às massas e volumes das amostras.

A tabela 2 mostra os valores calculados das densidades com seus respectivos erros.

Tabela 2 – Valores calculados para as amostras com seus respectivos erros.

<b>Amostras</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Calcita	2,42 ± 0,29
Ardósia	2,46 ± 0,26
Alumínio	2,52 ± 0,27
Mármore Branco	2,85 ± 0,32
Fluorita	2,88 ± 0,25
Hematita	4,95 ± 0,77
Galena	6,84 ± 0,55

### 4.3 CÁLCULO DO NÚMERO ATÔMICO EFETIVO

Para calcular o número atômico efetivo das amostras, foi utilizado a equação proposta por R. C. Murt em 1965<sup>[24]</sup>:

$$Z_{ef} = \sqrt[2,94]{f_1 \times (Z_1)^{2,94} + f_2 \times (Z_2)^{2,94} + f_3 \times (Z_3)^{2,94} + \dots}$$

onde  $f_n$  é a fração do número total de elétrons associado a cada elemento e  $Z_n$  é o número atômico de cada elemento. Para esse cálculo foi considerado que as amostras eram puras, ou seja, que não havia intrusão de outros compostos. Além disso, não foi considerado no cálculo os espaços porosos. Para as amostras compostas, como ardósia e mármore branco, foi considerada a seguinte porcentagem das suas composições mineralógicas: ardósia (40% Quartzo, 40% Sericita e 20% de Clorita) e mármore branco (90% Dolomita e 10% Calcita). A tabela 3 mostra os valores calculados para o número atômico efetivo para as amostras.

Tabela 3 – Números atômicos efetivos calculados para as amostras.

<b>Amostras</b>	<b>Número Atômico Efetivo</b>
Ardósia	10,9
Alumínio	13,0
Mármore Branco	13,1
Calcita	15,1
Fluorita	16,6
Hematita	22,9
Galena	77,3

#### 4.4 SISTEMA MICROTOMOGRÁFICO SKYSCAN 1172

No trabalho foi utilizado um microtomógrafo da SkyScan, modelo 1172 <sup>[25]</sup>, instalado em 2012 no Laboratório Multiusuário de Aplicações de Raios X da Universidade Estadual de Londrina (LARX/UEL). Sua composição é basicamente um tubo de raios X, sistema de posicionamento/movimentação da amostra, sistema de intensificação do sinal (cintilador) e uma câmara CCD (detector). Um esquema

desse equipamento é mostrado na figura 23. Já a figura 24 mostra o equipamento utilizado com suas dimensões e a figura 25 está mostrando o porta-amostras.

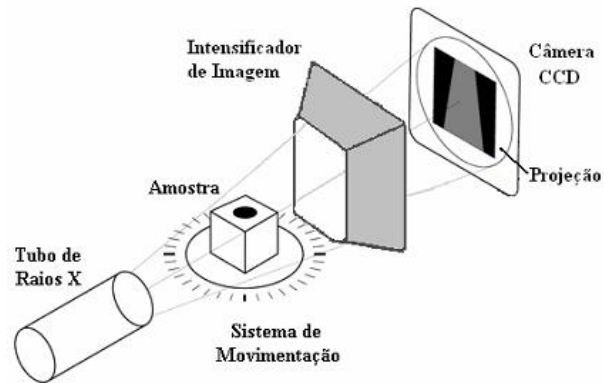


Figura 23 – Modelo esquemático da composição do microtomógrafo SkyScan 1172 <sup>[19]</sup>.

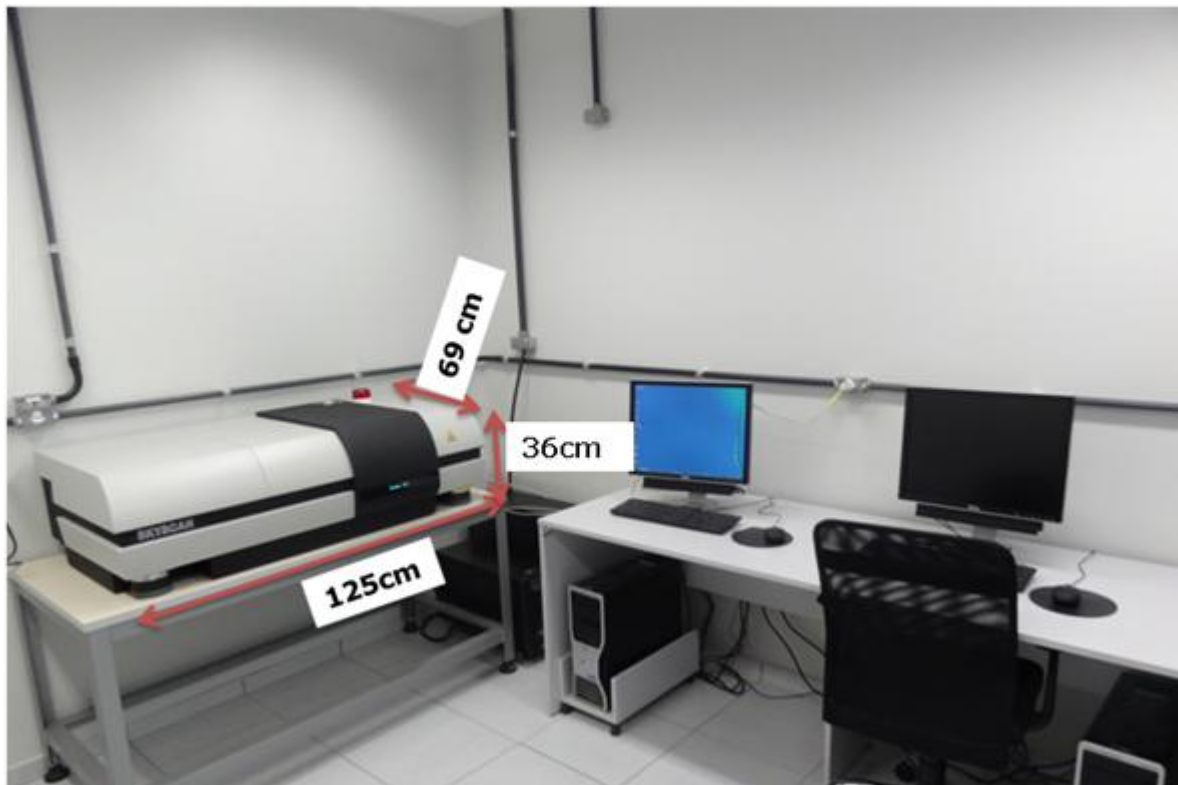


Figura 24– Microtomógrafo SkyScan 1172 instalado no LARX/Uel.

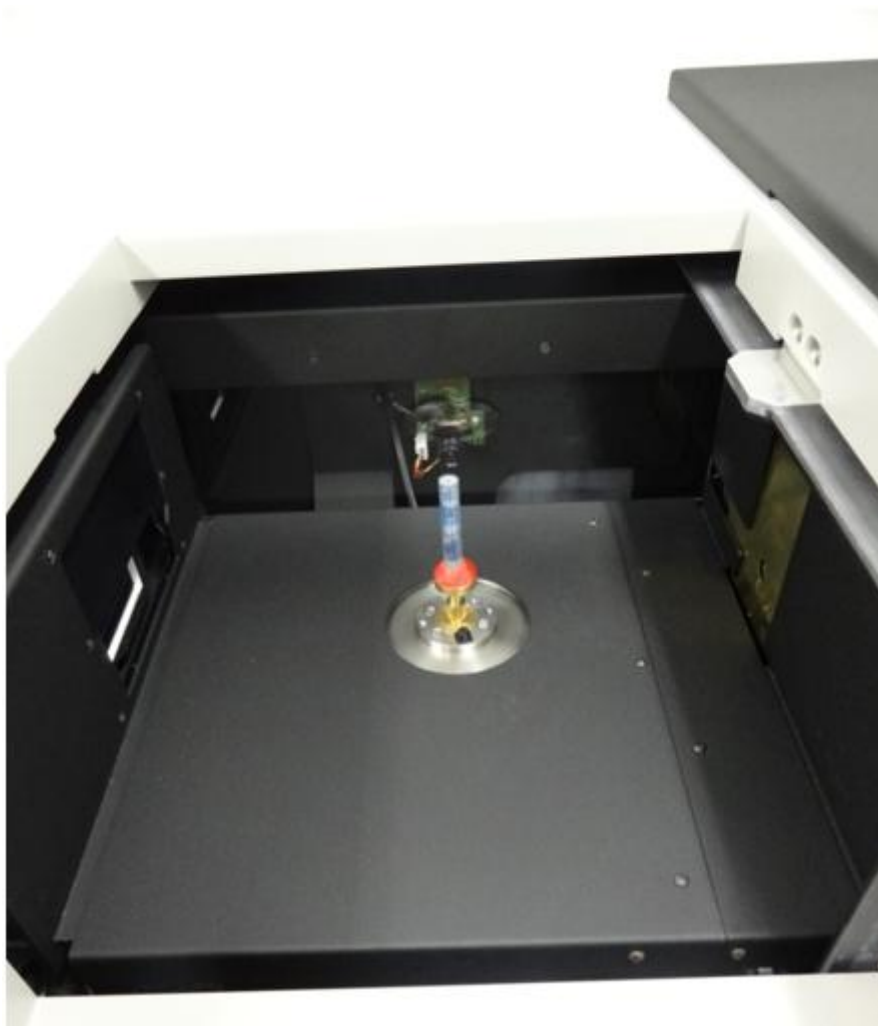


Figura 25– Microtomógrafo SkyScan 1172 instalado no LARX/UEL – detalhe do porta amostras.

O microtomógrafo possui um tubo de raios X microfoco com anodo de tungstênio, modelo Hamamatsu L7901-01, refrigerado a ar. A tensão de operação do equipamento pode variar de 20 kV até 100 kV, a corrente de 0 a 250  $\mu$ A, ambos valores associados para fornecer uma potência máxima de 10 W.

A detecção é feita através de uma câmara CCD de 11 Mp, modelo Hamamatsu C4742-55-12HRF, 12 bit, refrigerada pelo efeito Peltier. O tamanho de cada célula da CCD é de 5,9 x 5,9  $\mu$ m, resultando em uma área efetiva de 15,5 x 23,6 mm. Essa câmara possui, ainda, um sistema que varia a quantidade de pixels: 2624 x 4000, 1312 x 2000 e 656 x 1000 pixels.

#### 4.5 PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO

Na microtomografia podemos variar alguns parâmetros que melhoram a qualidade das imagens adquiridas. Dentre elas estão: a tensão e a corrente no tubo de raios X, resolução espacial, passo angular, “frames” e a utilização de filtros físicos.

A tensão no tubo de raios X é um dos parâmetros mais importantes na microtomografia. A escolha da tensão influencia no espectro de emissão de raios X pelo tubo. A figura 26 mostra o espectro de emissão de raios X para várias tensões aplicadas no tubo. Nesse trabalho, a tensão aplicada no tubo é o parâmetro mais importante, pois ela é que interfere no espectro de energia. Utilizaram-se as tensões: 50, 60, 70, 80, 90 e 100 kV.

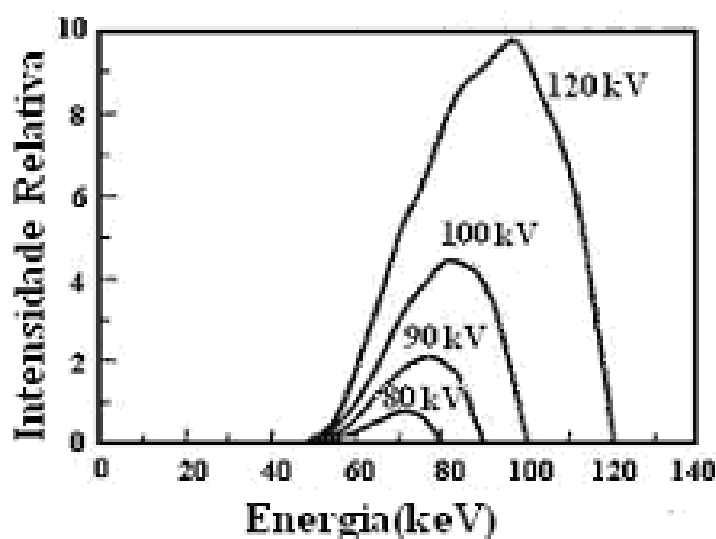


Figura 26 - Espectro típico de um tubo de raios X com alvo de Tungstênio em função da tensão aplicada <sup>[26]</sup>.

O valor da corrente aplicada no tubo de raios X permite uma maior qualidade nas imagens microtomográficas - pode melhorar as estatísticas das medidas – visto que aumenta a intensidade da transmitância para uma dada voltagem aplicada. No microtomógrafo SkyScan 1172 os valores da corrente são ajustados

automaticamente, dependendo da tensão escolhida (o software escolhe um valor que manterá a potência em 10 W).

O passo angular é o incremento dado pelo sistema de rotação à amostra depois de uma medida. Se, por exemplo, for utilizado um passo angular de  $0,4^\circ$  - como foi utilizado nesse trabalho - significa que após uma medida a amostra é rotacionada em  $0,4^\circ$  e uma nova medida é realizada. Esse processo ocorre até que a amostra seja rotacionada em  $180^\circ$  ou  $360^\circ$ , dependendo da escolha do usuário.

“Frames” é a média das projeções dada pelo software a partir de um conjunto de medidas realizado. Se a escolha do “frames” for N, significa que, para uma dada posição da amostra, serão feitas N medidas e depois será calculada uma média delas.

A resolução espacial é o parâmetro que interfere no que se pode “ver” dentro da amostra. Se, por exemplo, for escolhida uma resolução espacial de  $10\ \mu\text{m}$ , significa que objetos menores que esse tamanho não serão distinguíveis. Nesse trabalho foi utilizada uma resolução espacial de  $13,1\ \mu\text{m}$ .

Outro parâmetro importante, mas que não pode ser ajustado diretamente pelo usuário, é a resolução de contraste. Ela está relacionada com a capacidade de distinção de regiões com tons de cinza semelhantes, ou seja, é a capacidade do sistema distinguir uma região da sua região circundante em relação à diferença de atenuação. Ela depende da voltagem aplicada, densidade, espessura e composição química da amostra.

Há ainda um parâmetro que pode ser usado para atenuar raios X de baixas energias. Para isso, utilizam-se filtros físicos em frente à câmara CCD: filtro de 1 mm de alumínio, 1 mm de alumínio justaposto com cobre e a opção sem filtro. Nesse trabalho optou-se por utilizar o filtro de 1 mm de alumínio. O objetivo desses filtros é diminuir o artefato “beam hardening”.

Outros parâmetros importantes são: o tempo de exposição, que é o tempo de cada medida, e o “random movement”, que faz com que à medida que a amostra gira, seja realizado um movimento de subida e descida, ajudando assim na diminuição de ruídos nas imagens.

A tabela 4 mostra os parâmetros de medidas utilizados nesse trabalho.

Tabela 4 - parâmetros de medidas utilizados.

<b>Tensão (kV)</b>	100;90;80;70;60;50	<b>Passo Angular (°)</b>	0,4
<b>Corrente (µA)</b>	100;112;124;141;167;201	<b>Frames</b>	3
<b>Resolução (µm)</b>	13,1	<b>Random movement</b>	10
<b>Filtro</b>	Al	<b>Rotação da Amostra</b>	180°
<b>Tempo de exposição (ms)</b>	2000	<b>Grid size (pixels)</b>	2000x1336

#### 4.6 SOFTWARES UTILIZADOS

Em microtomografia, tanto as aquisições de imagens quanto suas análises, requerem a utilização de softwares específicos. A seguir está um resumo dos softwares utilizados.

##### 4.6.1 Software SkyScan 1172

É o software que opera o microtomógrafo para a aquisição de dados. Nele, insere-se os parâmetros das medidas a serem feitas (esses parâmetros estão

descritos no item anterior), além das opções de salvar, de observar o perfil de transmissão da radiação pela amostra, etc.

#### 4.6.2 Software NRecon

Esse software é o responsável por fazer as reconstruções das imagens através de um algoritmo de retroprojeção filtrada, baseado nas imagens microtomográficas adquiridas pelo software SkyScan 1172. No software há uma opção de “preview” que permite uma visualização de uma dada fatia reconstruída. Isso é feito para que sejam ajustados alguns parâmetros de reconstrução. Esses parâmetros são: “Smoothing”, que é um filtro mediano, auxiliando na diminuição de ruídos nas imagens; “Alinhamento”, que corrige eventuais variações de posição da amostra durante a aquisição de dados; “Ring Artifact”, que corrige os artefatos de anel, provenientes das diferenças de resposta de cada detector da câmara CCD à radiação e “Beam Hardening”, que diminui o efeito do endurecimento do feixe causado por raios X de baixa energia que são absorvidos pela borda da amostra.

#### 4.6.3 Software Imago

Desenvolvido pelo Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) da Universidade Federal de Santa Catarina, em colaboração com a ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software) e CENPES/Petrobras, esse software é utilizado nas análises das imagens 2D reconstruídas. Nesse trabalho ele foi utilizado para fazer a escolha de um ROI (region of interest) nas imagens, para recortar as regiões selecionadas e exportar esses dados em forma de texto que posteriormente eram analisados pelo Excel para o cálculo das médias dos tons de cinza (cada média de tom de cinza envolvia de 300 a 400 mil valores de tons de cinza).

## 4.7 AQUISIÇÕES DOS DADOS

### 4.7.1 Formas de Obtenção dos Dados

Como todas as amostras juntas possuem cerca de 35 mm, não há como medi-las de uma única vez, pois, juntas, elas excedem o tamanho do detector. A figura 27 mostra uma projeção de uma medida em 100 kV que mostra essa situação.

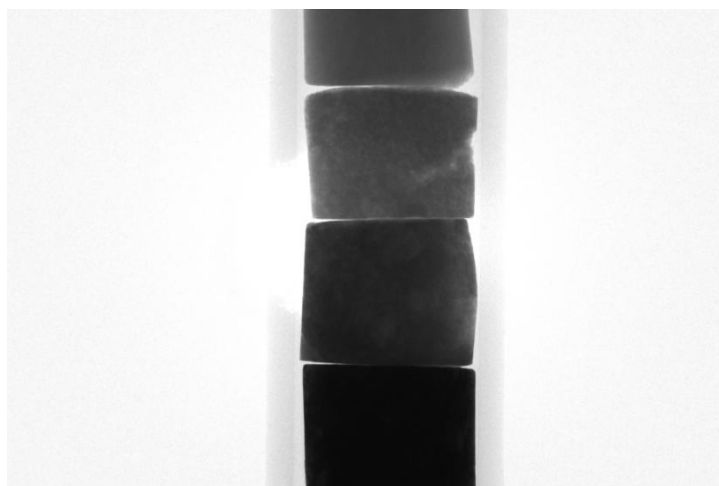


Figura 27 – Projeção de uma medida em 100 kV mostrando que as amostras excedem o tamanho do detector.

Para contornar esse fato, há duas opções no software que permitem a realização de vários escaneamentos, para o caso da amostra exceder o tamanho do detector. Uma forma é que o equipamento realiza múltiplos escaneamentos (no caso desse trabalho foram três) e no final une todos os dados em uma “única medida”; outra opção é que o software realiza escaneamentos independentes.

Essa diferença na forma de obter os dados pode ser um problema, visto que os tons de cinza são normalizados dependendo do quanto a radiação está sendo absorvida pelas amostras. Se, por exemplo, houver apenas amostras pouco atenuantes, os 256 tons de cinza serão distribuídos entre a parte da amostra mais

atenuante e a menos atenuante. Se as amostras são variadas em escaneamentos independentes, varia a distribuição de tons de cinza em cada escaneamento.

A fim de verificar se há diferenças entre os tons de cinza médios de cada amostra, foram feitas medidas nessas duas formas de obtenção de dados. A tabela 5 compara esses tons de cinza.

Tabela 5 – Comparação dos tons de cinza calculados para as duas formas de aquisição de dados no microtomógrafo (80kV).

Amostras	Um escaneamento		Vários escaneamentos independentes	
	Tom de Cinza	Desvio Padrão	Tom de Cinza	Desvio Padrão
Ardósia	40	8	78	7
Mármore Branco	49	9	96	9
Calcita	67	10	103	9
Hematita	105	30	146	30

Os valores médios de tons de cinza são diferentes nas duas formas de obtenção dos dados. Quando o software realiza escaneamentos independentes, ele distribui os tons de cinza entre o material menos atenuante (no caso o ar) e o mais atenuante nessa medida. No caso de apenas um escaneamento, os tons de cinza são distribuídos ao final de todos os escaneamentos, distribuindo assim os tons de cinza entre todos os materiais medidos. Pela tabela, nota-se que não há uma grande diferença nos valores dos tons de cinza quando se considera o intervalo entre a ardósia e a hematita nos casos considerados (para um escaneamento a variabilidade foi 65; para vários escaneamentos independentes, 68). Porém, quando se observa a variação dos tons de cinza entre as amostras, ela é maior para o caso de vários escaneamentos independentes. Em vista disso, optou-se por realizar as medidas com apenas um escaneamento.

## 4.8 MÉTODOS DE RECONSTRUÇÃO

### 4.8.1 Escolha dos Parâmetros de Reconstrução

Para realizar as reconstruções das amostras, há duas possibilidades: utilizar os parâmetros de reconstrução definidos para uma amostra e aplicar às demais ou otimizar os parâmetros de reconstruções de forma individual para cada amostra. A tabela 6 mostra os tons de cinza calculados utilizando um parâmetro de reconstrução para todas as amostras (otimizado para a fluorita) e os tons de cinza calculados para as reconstruções feitas individualmente (80 kV). A figura 28 mostra um gráfico relacionando os tons médios de cinza obtidos para cada amostra em função da densidade para esses dois tipos de reconstrução.

Pela tabela percebe-se que os tons de cinza – mesmo levando em conta o desvio padrão – não estão próximos. Isso ocorre porque ao ajustar os parâmetros para cada amostra, varia-se o tom de cinza da mesma. Assim, não é possível ajustar os melhores parâmetros de reconstrução sem que isso interfira no tom de cinza característico da amostra. Porém, é claro, também não é ideal fazer a reconstrução com apenas um parâmetro para todas as amostras. Já a figura 28 mostra que é possível traçar uma reta relacionando a densidade com o tom de cinza apenas quando há um parâmetro de reconstrução para as amostras (pontos vermelhos). Quando as reconstruções são individuais não há um padrão linear entre as grandezas. Nesse cenário, optou-se por utilizar um parâmetro de reconstrução e aplicá-los a todas as amostras.

Tabela 6 – Comparação entre os tons de cinza calculados utilizando um parâmetro de reconstrução para todas as amostras e os tons de cinza calculados para as reconstruções feitas individualmente (80 kV).

Amostras	Um parâmetro de reconstrução		Parâmetros de reconstrução individuais	
	Tom de Cinza	Desvio Padrão	Tom de Cinza	Desvio Padrão
Calcita	67	10	89	12
Ardósia	40	8	53	8
Alumínio	43	7	56	9
Mármore Branco	49	9	67	12
Fluorita	64	14	80	17
Hematita	105	30	72	19
Galena	146	27	95	12

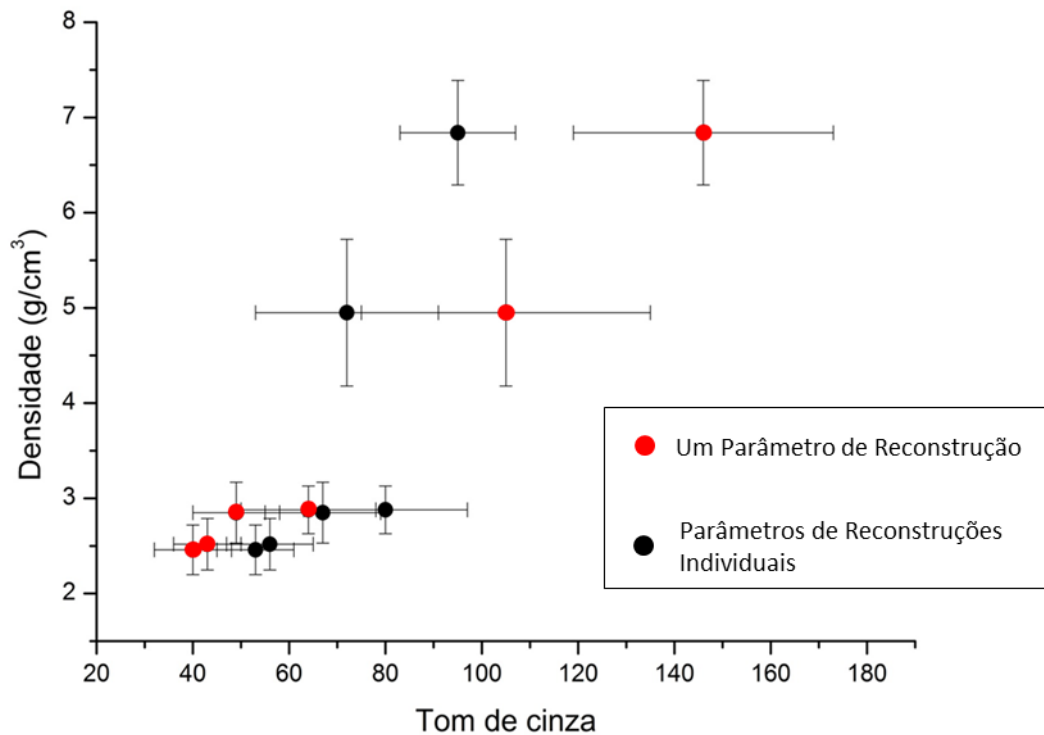


Figura 28 – Tom de cinza *versus* densidade usando um parâmetro de reconstrução e usando parâmetros de reconstrução individuais.

#### 4.8.2 Escolha da Amostra-base

Para a escolha da amostra-base, para definir os parâmetros de reconstrução, foram selecionadas três amostras – ardósia (baixa densidade), fluorita (densidade intermediária) e hematita (alta densidade), e feitas as reconstruções utilizando-as como base.

A figura 29 mostra como ficou a reconstrução das amostras utilizando os parâmetros otimizados para a ardósia. A tabela 7 fornece os tons médios de cinza obtidos para essa análise.

Considerando as energias utilizadas, números Atômicos e densidades das amostras envolvidas, o efeito de interação da radiação predominante é o espalhamento Compton. Desta forma, espera-se obter uma relação linear entre os tons de cinza e as propriedades físicas das amostras.

As figuras 30 e 31 mostram os melhores ajustes lineares obtidos entre os tons de cinza das amostras e suas densidades e números atômicos efetivos. Para isso, algumas amostras foram excluídas em função de apresentarem problemas que serão discutidos nos próximos itens. A saber: para o ajuste linear da densidade excluiu-se a calcita; para o número atômico efetivo, a calcita e a galena.

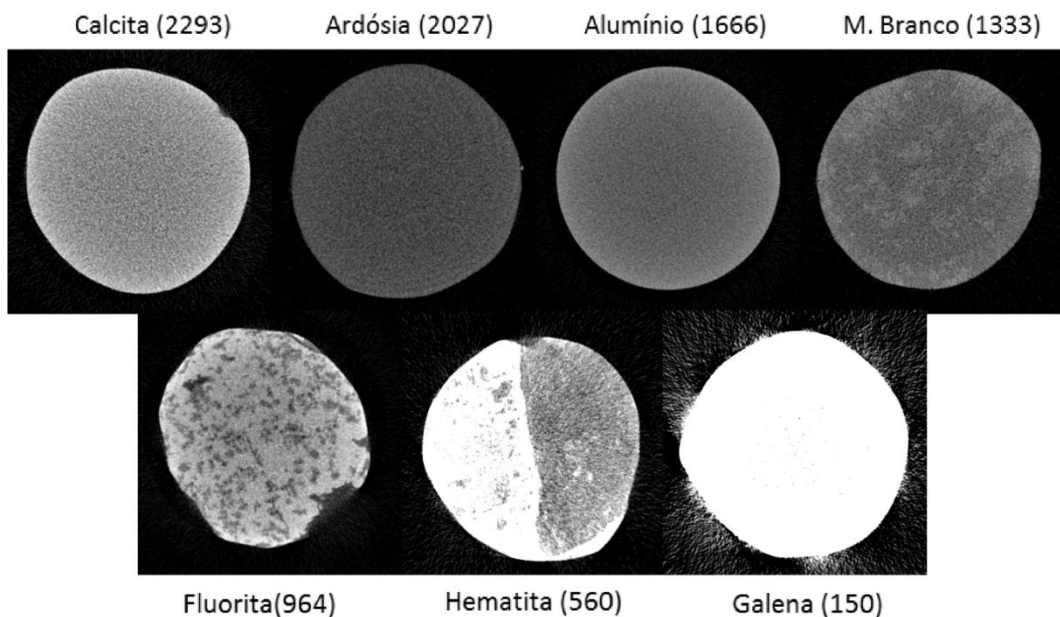


Figura 29 - Reconstrução de uma fatia 2D das amostras, tendo como base os parâmetros de reconstrução da ardósia, para 100 kV (entre parênteses está o número da fatia).

Tabela 7 - Médias dos tons de cinza para as amostras, densidade e números atômicos efetivos utilizando como base a ardósia (100 kV).

<b>Amostras</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Erro</b>	<b>Número Atômico Efetivo</b>	<b>Tom de Cinza</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Calcita</b>	2,42	0,29	15,0	136	19
<b>Ardósia</b>	2,46	0,26	10,9	78	14
<b>Alumínio</b>	2,52	0,27	13,0	88	10
<b>Mármore Branco</b>	2,85	0,32	13,1	92	15
<b>Fluorita</b>	2,88	0,25	16,6	133	24
<b>Hematita</b>	4,95	0,77	22,9	203	50
<b>Galena</b>	6,84	0,55	77,3	254	6

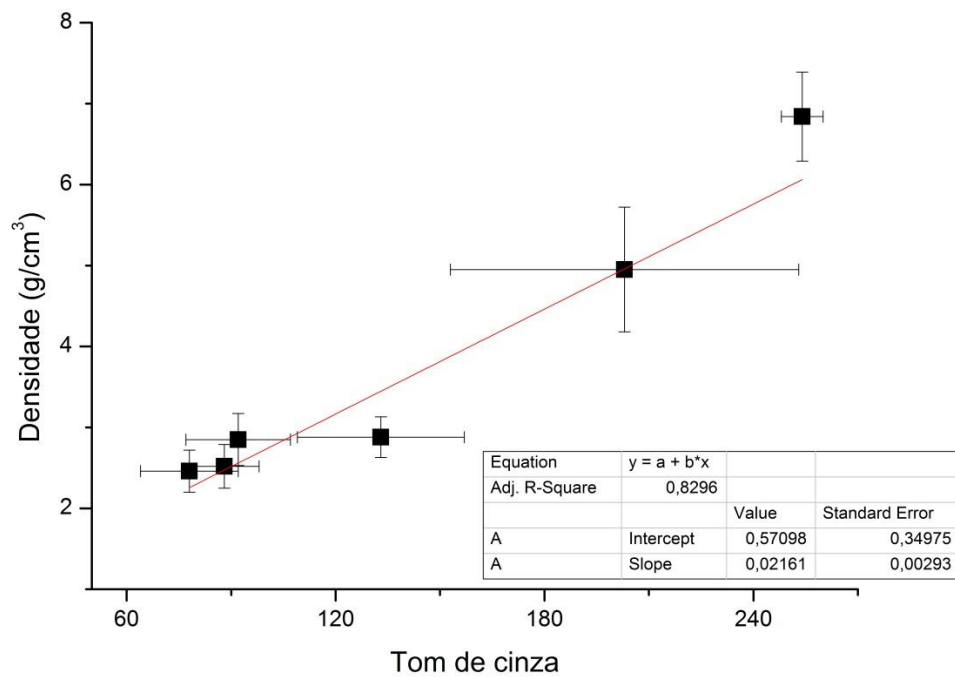


Figura 30 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades usando os parâmetros de reconstrução da ardósia como base (100 kV).

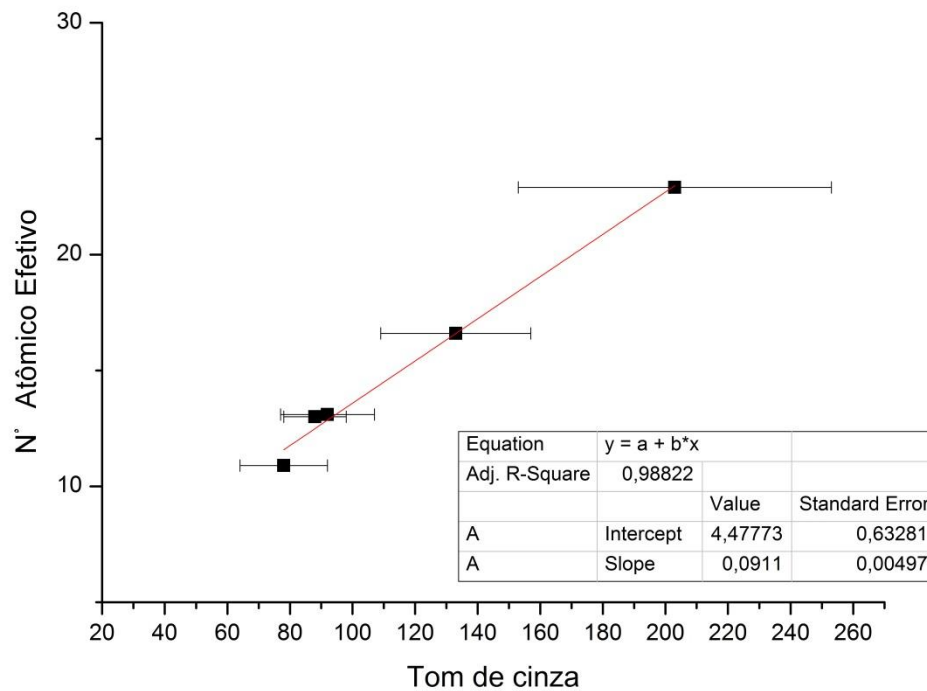


Figura 31 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos usando os parâmetros de reconstrução da ardósia como base (100 kV).

No caso do ajuste linear entre os tons de cinza e a densidade, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 82,96%; entre os tons de cinza e os números atômicos efetivos, 98,82%.

A figura 32 mostra a reconstrução de uma fatia de cada amostra, tendo como base os parâmetros de reconstrução da fluorita, para 100 kV. Já a tabela 8 fornece os tons médios de cinza obtidos nessa reconstrução

Nas figuras 33 e 34 estão mostrados os melhores ajustes lineares (para 100 kV) obtidos nas reconstruções utilizando a fluorita como base. No caso dos tons de cinza e densidade a calcita foi excluída; no caso da densidade e número atômico efetivo, a calcita e a galena.

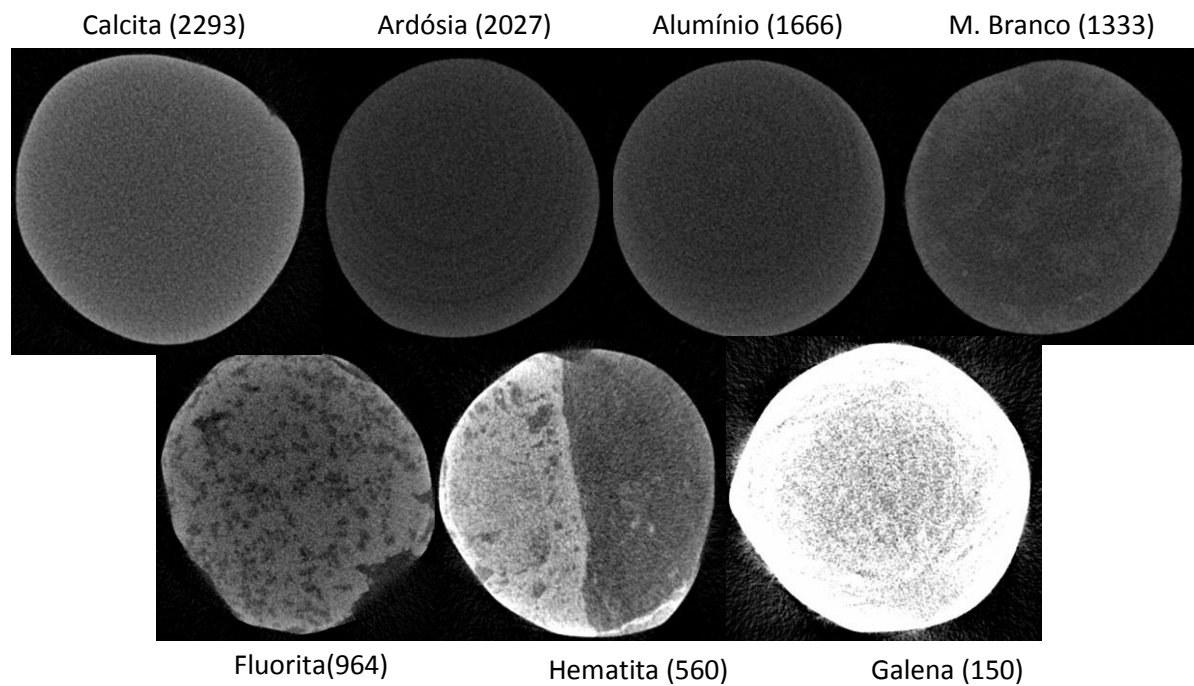


Figura 32 - Reconstrução de uma fatia 2D das amostras, tendo como base os parâmetros de reconstrução da fluorita, para 100 kV (entre parênteses está o número da fatia).

Tabela 8 – Médias dos tons de cinza para as amostras, densidade e números atômicos efetivos utilizando como base a fluorita (100 kV).

<b>Amostras</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Erro</b>	<b>Número Atômico Efetivo</b>	<b>Tom de Cinza</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Calcita</b>	2,42	0,29	15,0	37	6
<b>Ardósia</b>	2,46	0,26	10,9	50	8
<b>Alumínio</b>	2,52	0,27	13,0	54	7
<b>Mármore Branco</b>	2,85	0,32	13,1	63	8
<b>Fluorita</b>	2,88	0,25	16,6	70	7
<b>Hematita</b>	4,95	0,77	22,9	81	10
<b>Galena</b>	6,84	0,55	77,3	101	17

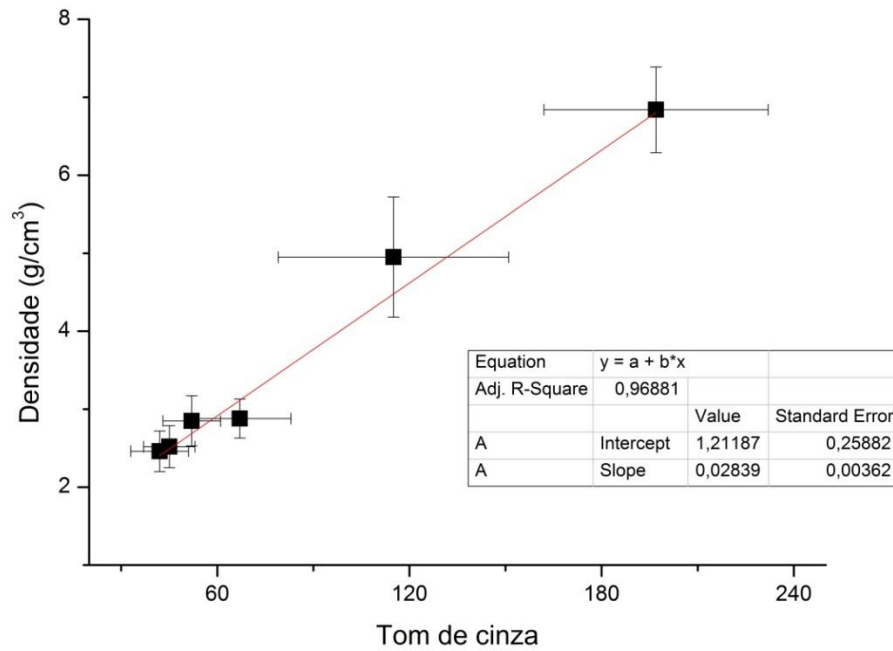


Figura 33 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades utilizando como base os parâmetros de reconstrução da fluorita (100 kV).

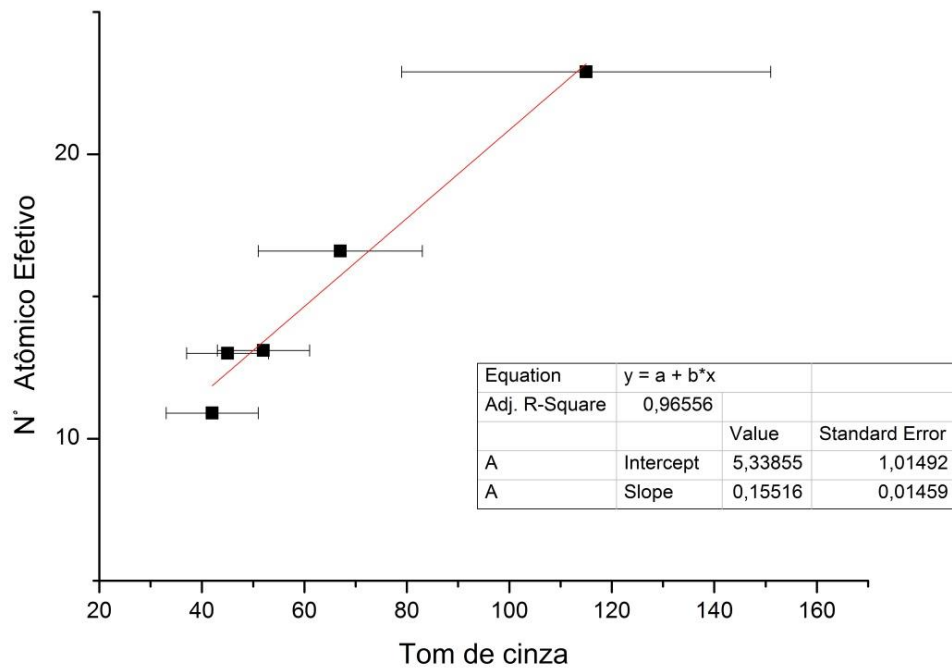


Figura 34 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos utilizando como base os parâmetros de reconstrução da fluorita (100 kV).

O coeficiente de determinação, para o ajuste linear entre o tom médio de cinza e a densidade, foi de 96,88%; para o caso do tom de cinza *versus* número atômico efetivo, 96,55%.

Por fim, a figura 35 mostra reconstruções de fatias das amostras utilizando os parâmetros de reconstrução otimizados para a hematita. Já na tabela 9, os tons de cinza obtidos para as amostras são dados.

Nas figuras 36 e 37 estão mostrados os gráficos relacionando os tons de cinza das amostras em relação às densidades e aos números atômicos efetivos das amostras. Por motivos que serão explicados nos itens posteriores, a calcita foi excluída da análise da densidade e do número atômico efetivo. Já a galena foi excluída do gráfico contendo o número atômico efetivo.

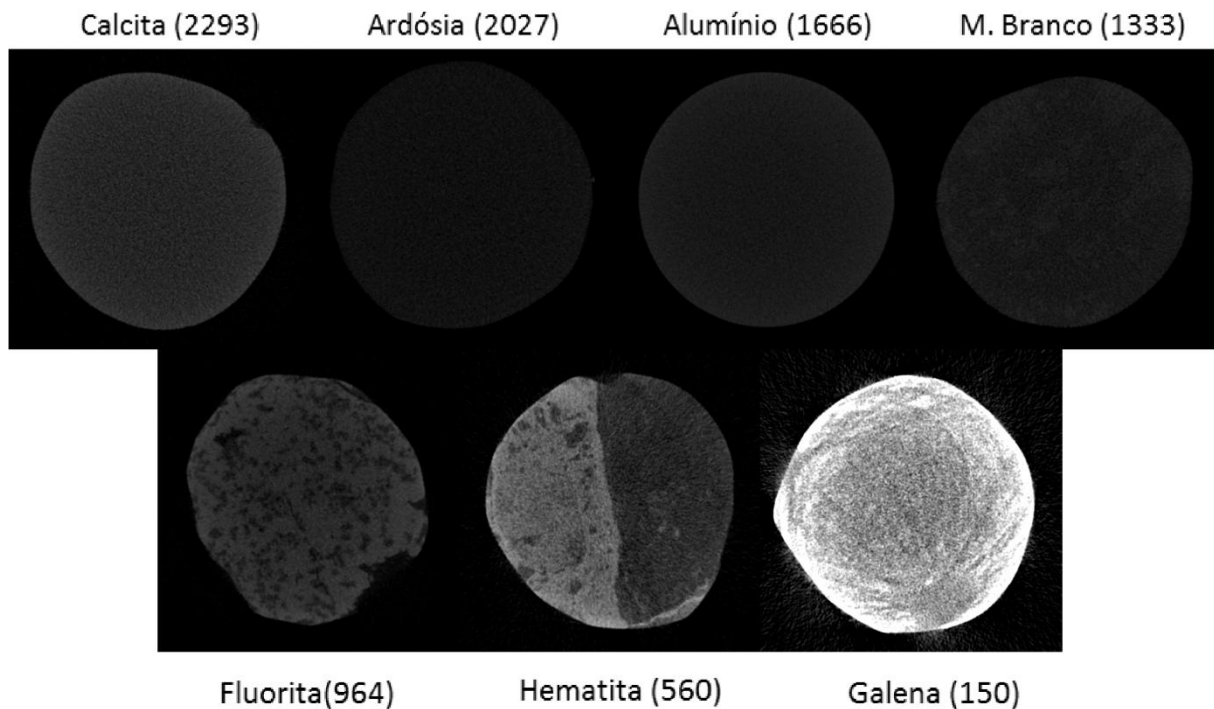


Figura 35 - Reconstrução de uma fatia 2D das amostras, tendo como base os parâmetros de reconstrução da hematita, para 100 kV (entre parênteses está o número da fatia).

Tabela 9– Média dos tons de cinza para as amostras, densidade e números atômicos efetivos utilizando como base a hematita (100 kV).

<i>Amostras</i>	<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Erro</i>	<i>Número Atômico Efetivo</i>	<i>Tom de Cinza</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<b>Calcita</b>	2,42	0,29	15,0	37	6
<b>Ardósia</b>	2,46	0,26	10,9	19	4
<b>Alumínio</b>	2,52	0,27	13,0	22	3
<b>Mármore Branco</b>	2,85	0,32	13,1	23	5
<b>Fluorita</b>	2,88	0,25	16,6	36	8
<b>Hematita</b>	4,95	0,77	22,9	65	23
<b>Galena</b>	6,84	0,55	77,3	130	27

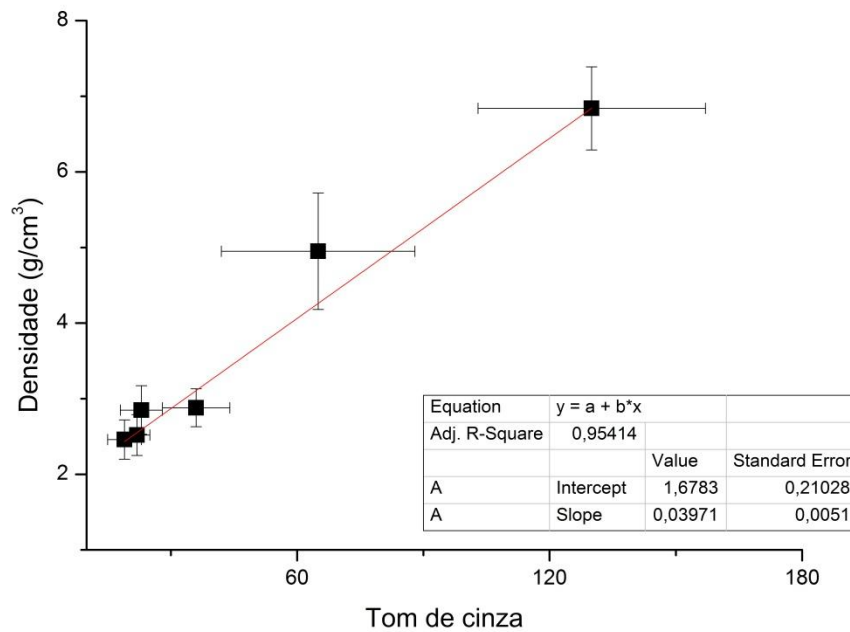


Figura 36 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades utilizando como base os parâmetros de reconstrução da hematita (100 kV).

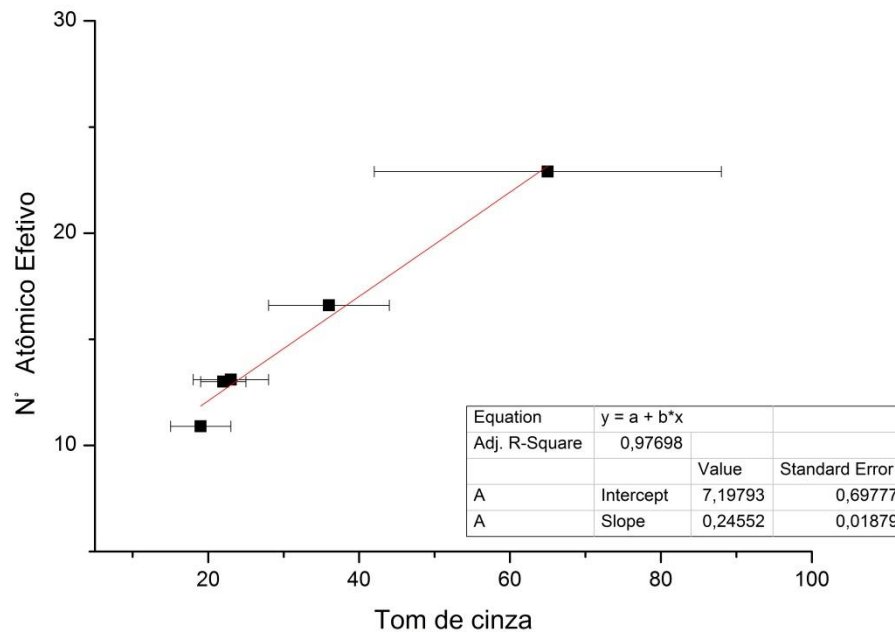


Figura 37 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos utilizando como base os parâmetros de reconstrução da hematita (100 kV).

Utilizando os parâmetros de reconstrução otimizados para a hematita e aplicados às demais amostras, obtém-se um coeficiente de determinação de 95,41%, para o ajuste linear entre o tom de cinza e a densidade e de 97,90% para o tom de cinza e o número atômico efetivo.

A tabela 10 mostra os coeficientes de determinação obtidos nos ajustes lineares tendo como base as amostras ardósia, fluorita e hematita.

Tabela 10– Coeficientes de determinação obtidos pelos ajustes lineares utilizando diferentes amostras-bases.

<b>Amostra-base</b>	<b><math>R^2</math> (%)</b>	<b><math>R^2</math> (%)</b>
	<b>(Tom de cinza x densidade)</b>	<b>(Tom de cinza x número atômico efetivo)</b>
<b>Ardósia</b>	82,96	98,82
<b>Fluorita</b>	96,88	96,55
<b>Hematita</b>	95,41	97,90

Analisando a tabela 10, nota-se que os valores dos coeficientes de determinação obtidos para a fluorita e a hematita estão próximos (o que não acontece para a ardósia). Já no caso da reta relacionando o tom de cinza e o número atômico efetivo, o valor de  $R^2$  para a fluorita está num valor intermediário entre a ardósia e a hematita. A escolha da fluorita como amostra base para a reconstrução das demais se fortalece quando se observa as fatias reconstruídas utilizando as amostras como base. Nota-se que, quando se utiliza a fluorita como base, obtém-se uma melhor resolução de contraste para as amostras num contexto geral, do que quando se utiliza as outras amostras. Por essas razões, os parâmetros de reconstrução da fluorita foram escolhidos e usados como parâmetros das demais amostras.

#### 4.8.3 Escolha da Energia-base

Para a reconstrução, utilizou-se como base a fluorita, otimizou-se os parâmetros para ela e esses parâmetros foram aplicados às demais amostras para todas as tensões aplicadas no tubo de raios X. A fim de determinar qual a melhor energia para ser usada, foram feitas reconstruções individuais da fluorita nas tensões de 50 kV (energia mais baixa), 80 kV (energia intermediária) e 100 kV (energia mais alta); os parâmetros foram otimizados para cada tensão. A tabela 11 mostra os tons de cinza calculados para a fluorita em diferentes tensões e usando diferentes parâmetros de reconstrução.

Tabela 11 - Tons de cinza calculados para a fluorita em diferentes tensões e usando diferentes parâmetros de reconstrução.

	<b>Tom de cinza</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>100 kV</b>	67	16
<b>80 kV</b>	80	17
<b>50 kV</b>	84	18

Para as tensões de 80 e 50 kV, os valores de tons de cinza ficaram bem próximos. O que mais se distanciou foi o valor de tom de cinza calculado para a tensão de 100 kV, porém ele está dentro do intervalo de variabilidade dos tons de cinza, considerando os desvios. A figura 38 mostra uma mesma fatia da fluorita reconstruída com os mesmos parâmetros em três tensões diferentes.

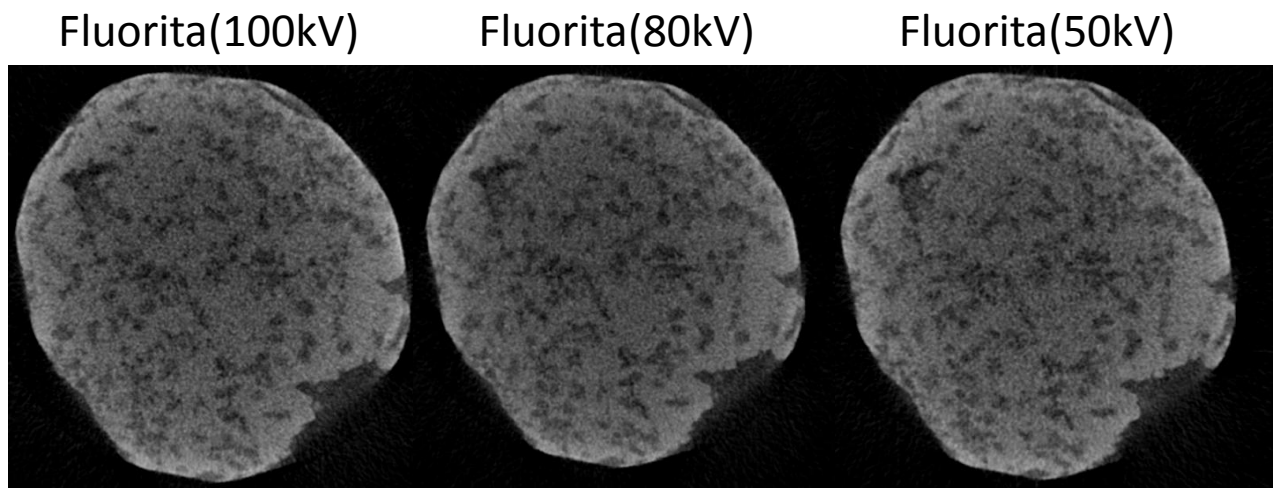


Figura 38 – Fatia da fluorita reconstruída com os mesmos parâmetros em três tensões diferentes.

Outra informação analisada foi o contraste das imagens da figura 38. Calculou-se, para oito fatias, o tom de cinza de uma região clara e dividiu-se esse valor pelo tom de cinza de uma região escura adjacente. A figura 39 mostra as duas regiões usadas para o cálculo do contraste.

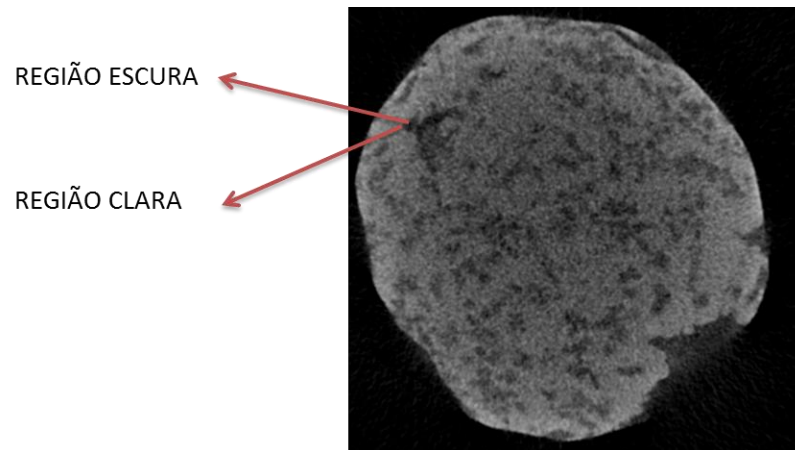


Figura 39 – Regiões da fatia da amostra de fluorita usadas para o cálculo do contraste.

A tabela 12 mostra os valores de contraste obtidos nas imagens para as três energias usadas.

Tabela 12 – Valores de contraste obtidos em fatias de fluorita nas energias de 50, 80 e 100 kV.

<b>Energia</b>	<b>Contraste</b>
<b>50 kV</b>	2,9
<b>80 kV</b>	2,2
<b>100 k V</b>	2,6

O melhor contraste é o da imagem obtida a 50 kV, seguido pela de 100 kV. Como os tons de cinza obtidos para a fluorita, dentro dos desvios padrões, são iguais e como o melhor contraste é para a energia de 50 kV, era de se esperar que essa energia fosse usada como base. Porém, quando se observa o perfil de transmissão da radiação nas amostras, nota-se que a transmissão é melhor na energia de 100 kV frente a de 50 kV. Isso é mostrado na figura 40.

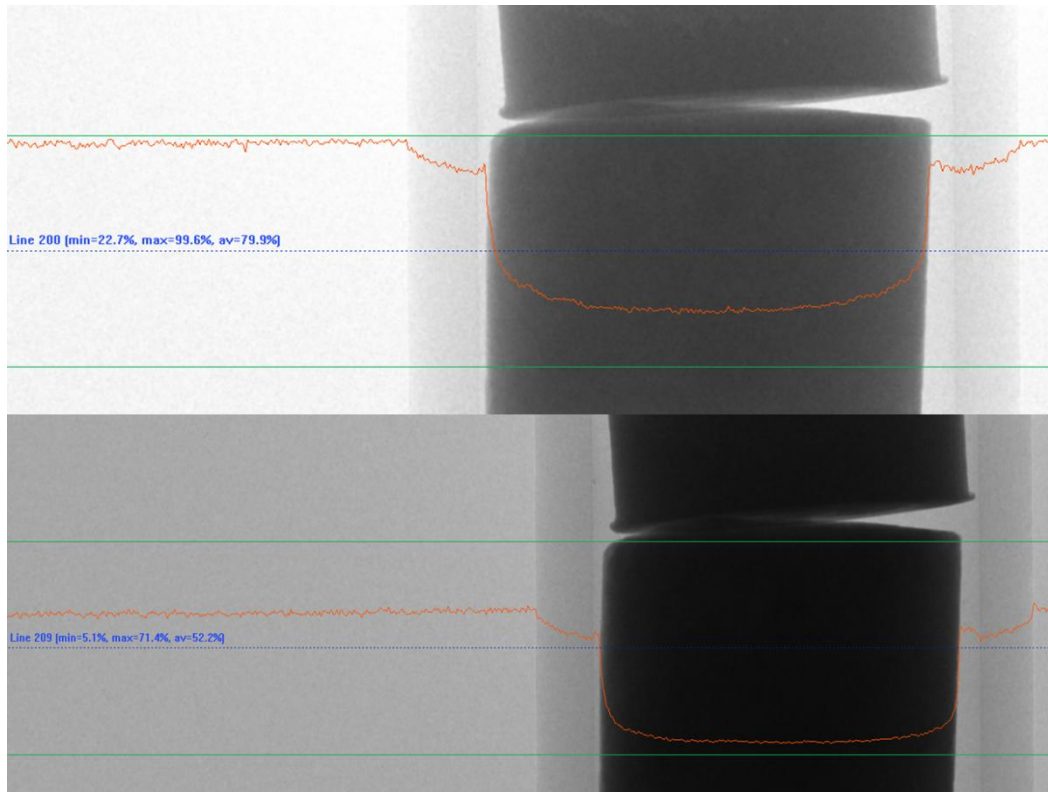


Figura 40 – Perfil de transmissão da radiação na amostra mármore branco em 100 kV (acima) e 50 kV (abaixo).

Frente a esses resultados, utilizou-se a fluorita como amostra-base. Os parâmetros foram otimizados para a energia de 100 kV e aplicado às demais amostras e às demais energias. Os parâmetros de reconstrução são: *Misalignment* -0,5, *Ring* 10 e *Beam Hardening* 20 %.

#### 4.8.4 Artefatos Presentes nas Imagens Reconstruídas

Para a maioria das amostras houve o aparecimento do efeito “beam hardening”. Isso não pode ser sanado porque foi escolhido um conjunto de parâmetros de reconstrução e este foi utilizado para todas as amostras. Se as amostras fossem reconstruídas com os melhores parâmetros individuais, não se poderiam fazer relações lineares entre o tom médio de cinza da amostra e sua densidade e número atômico efetivo (figura 28). Na hora de selecionar um ROI para

o cálculo do tom de cinza médio, essas áreas em que o efeito aparece foram excluídas. Já o artefato anel não está presente, de forma intensa, nas amostras reconstruídas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os itens subsequentes mostram os tons de cinza calculados para as diferentes tensões aplicadas no tubo de raios X, além dos gráficos relacionando esses tons de cinza com as densidades e os números atômicos efetivos das amostras.

A figura 41 mostra as projeções adquiridas em diferentes tensões. Nela, observa-se que a resolução de contraste diminui quando se diminui a energia da radiação.

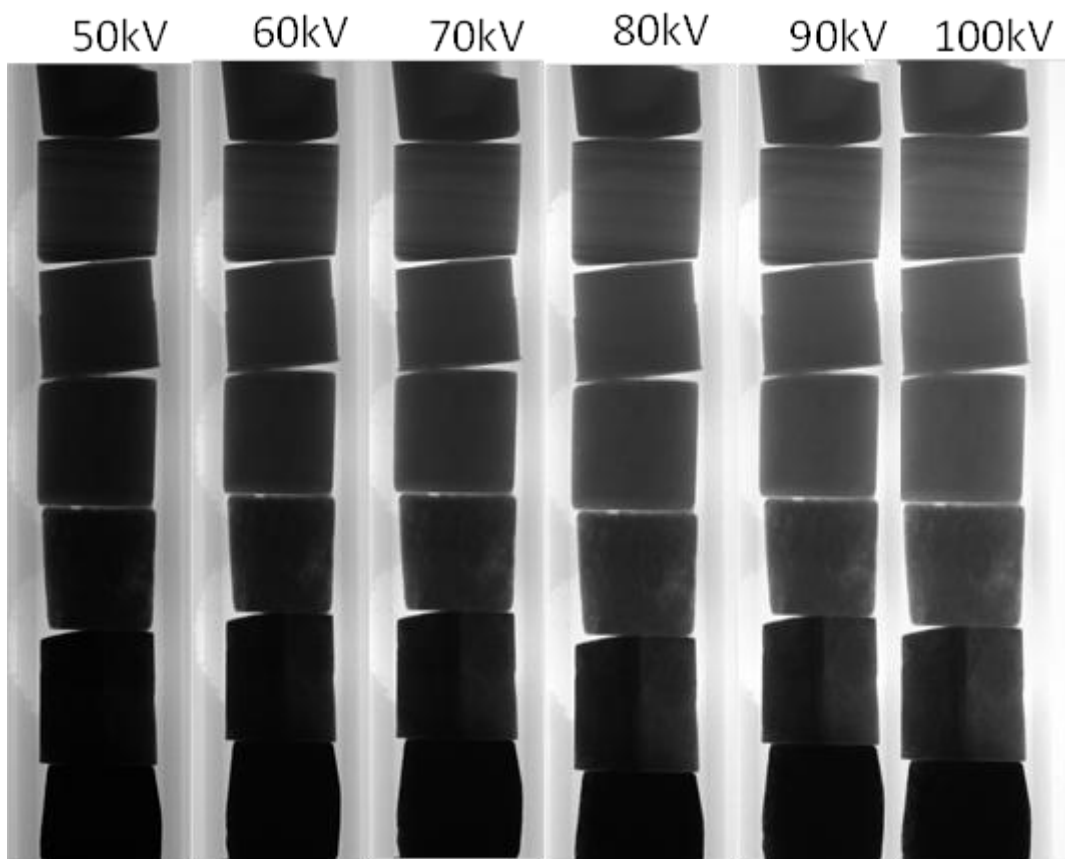


Figura 41 – projeções das amostras em diferentes energias.

A figura 42 mostra fatias 2D reconstruídas das amostras para todas as tensões usadas nesse trabalho.

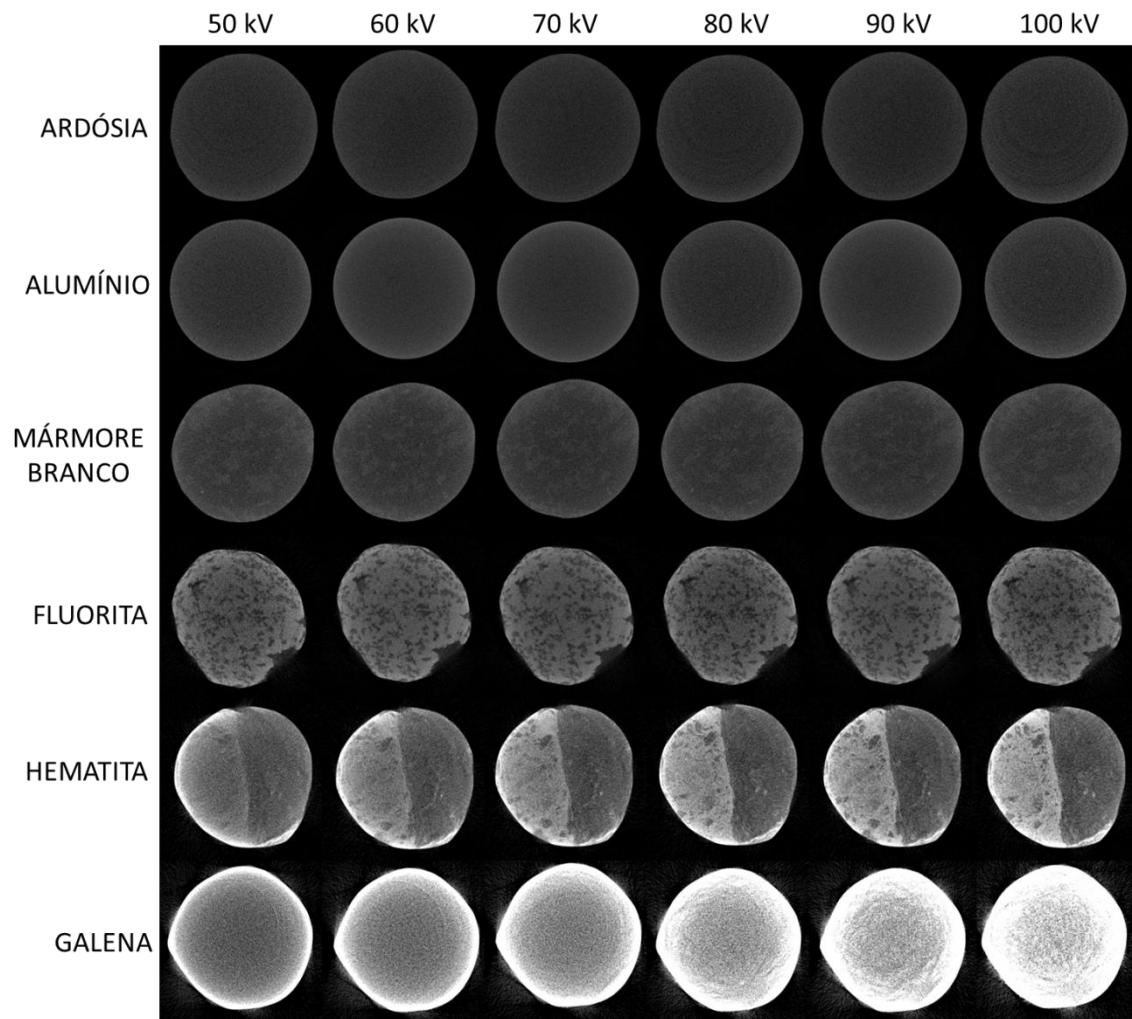


Figura 42 – fatias 2D reconstruídas das amostras nas energias estudadas nesse trabalho.

Para as amostras de baixa densidade, visualmente não se percebe variações em tonalidades de cinza. Já isso não ocorre para as amostras mais densas, como a hematita e a galena. Nelas, visualmente há uma variação nas tonalidades de cinza a medida que se diminui a tensão aplicada no tubo de raios X.

## 5.1 PRÉ-VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar a precisão da metodologia, foram plotados gráficos dos valores de tons de cinza *versus* densidade e *versus* o número atômico efetivo para as amostras em 100 kV. Apenas os dados referentes ao alumínio (que é o material de validação) e o da calcita não foram usados nesta etapa. O alumínio foi escolhido para a validação, pois dentre as amostras, a sua composição é a mais homogênea. Já a calcita foi excluída da análise, pois mesmo ela possuindo a menor densidade das amostras, seu tom de cinza foi mais elevado do que a ardósia, alumínio, mármore branco e a fluorita. Isso se deve ao fato que, além dos processos de interação da radiação com a matéria descritas anteriormente, deve ter ocorrido o fenômeno de difração da radiação na amostra, por esta ser cristalina. Esse fenômeno ocorre em estruturas cristalinas desviando, de forma regular, a radiação incidente nos planos cristalinos. Como esse processo ocorreu em todas as energias, a calcita foi excluída das demais análises. A figura 43 mostra o ajuste linear entre o tom de cinza das amostras e suas densidades, levando em conta os dados da calcita.

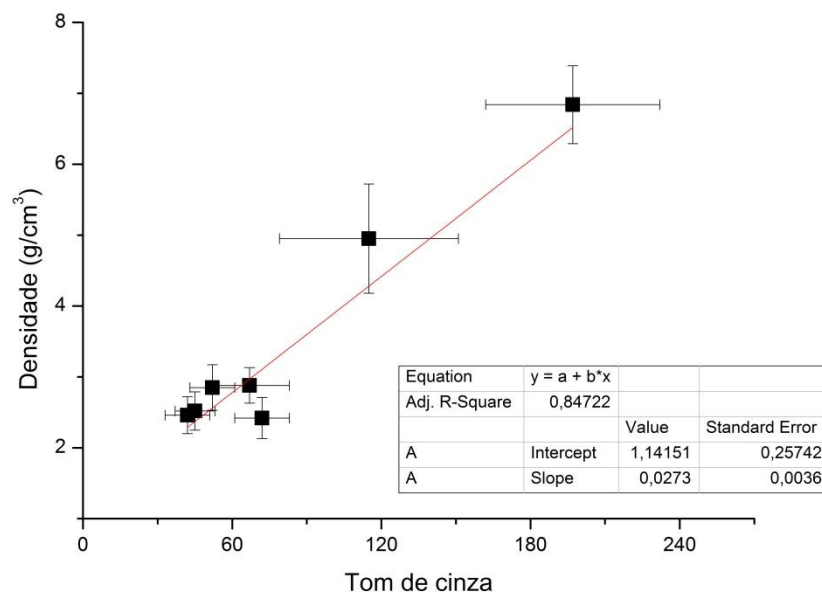


Figura 43 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras *versus* suas densidades para pré-validação da técnica, incluindo a calcita.

A figura 44 mostra o gráfico dos dados ajustados linearmente para a densidade e a figura 45 para o número atômico efetivo. Os dados referentes a esse gráfico estão presentes na tabela 24. Nota-se que o coeficiente de determinação é melhor quando se exclui a calcita. Portanto, nas próximas análises a calcita não estará presente.

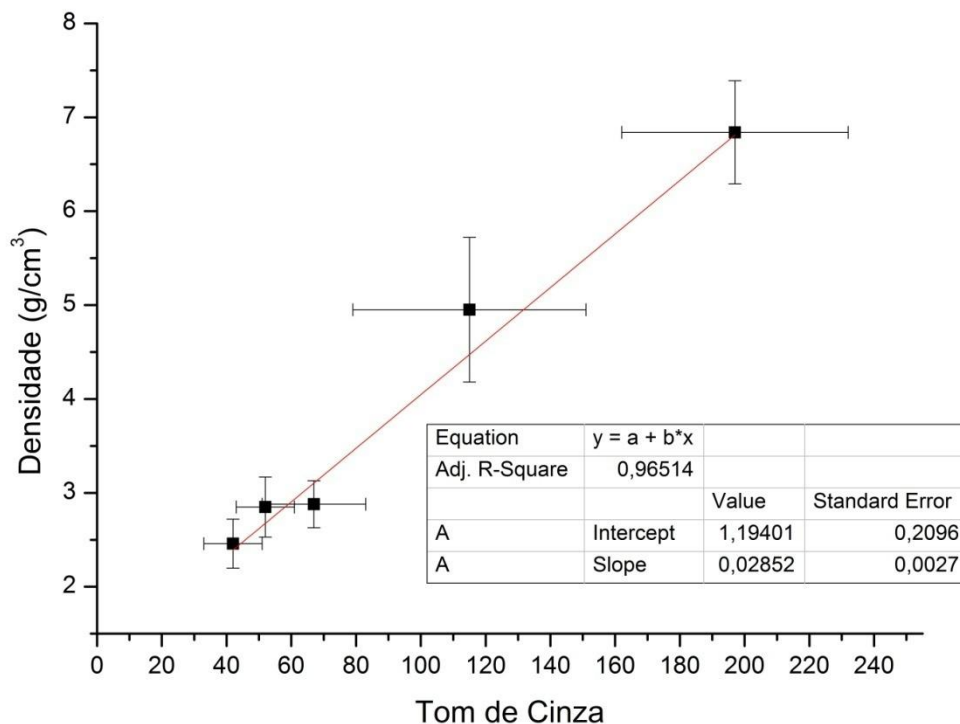


Figura 44 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para pré-validação da técnica.

O tom médio de cinza medido para o alumínio em 100 kV foi de 45, com um desvio padrão de 8 tons de cinza. Pelo ajuste dos dados do gráfico, o tom de cinza 45 corresponde a uma densidade de  $2,48 \pm 0,32 \text{ g/cm}^3$ . A densidade medida gravimetricamente para o alumínio foi de  $2,52 \text{ g/cm}^3$ , com um desvio de  $0,27 \text{ g/cm}^3$ . Portanto, o valor da densidade obtida para o alumínio pelo ajuste linear coincide com o valor calculado experimentalmente.

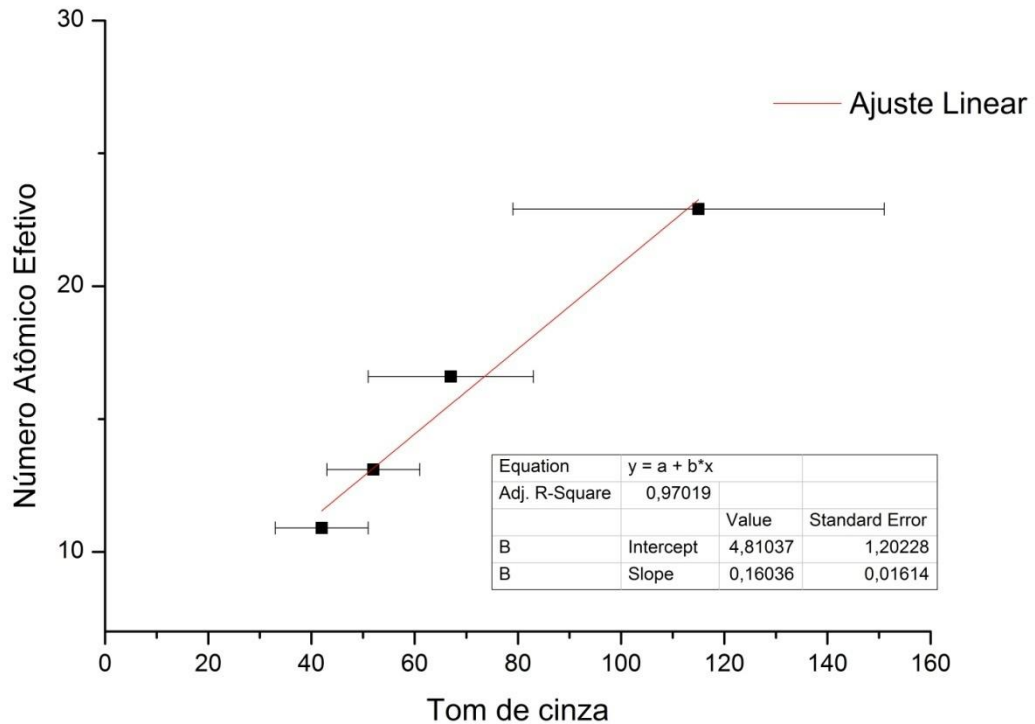


Figura 45 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para validação da técnica.

Utilizando a equação de ajuste linear dos dados, o número atômico efetivo do alumínio seria 12, frente aos 13 calculados teoricamente. Porém, devido ao desvio padrão, o intervalo de confiança para o valor do número atômico efetivo é de 10,7 até 13,3. Portanto, os valores experimentais e teóricos coincidem.

A tabela 13 mostra as equações de ajustes calculadas nessa pré-validação da técnica.

Tabela 13 – Equações de ajustes lineares para a densidade e número Atômico Efetivo para a validação da técnica.

	<b>Densidade x Tom de cinza</b>	<b>Número Atômico Efetivo x Tom de cinza</b>
<b>Equação</b>	$d = 1,19 + 0,03TC$	$Z_{ef} = 4,81 + 0,16TC$
	d= densidade da amostra $Z_{ef}$ = Número Atômico Efetivo TC= Tom de Cinza	

## 5.2 TENSÃO DE 100 kV

A tabela 14 mostra as médias dos tons de cinza das amostras calculados para a tensão de 100 kV, além de mostrar a densidade e o número atômico efetivo calculado para cada amostra.

Tabela 14– Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (100 kV).

<b>Amostras</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Erro</b>	<b>Número Atômico Efetivo</b>	<b>Tom de Cinza</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Ardósia</b>	2,46	0,26	10,9	42	9
<b>Alumínio</b>	2,52	0,27	13,0	45	8
<b>Mármore Branco</b>	2,85	0,32	13,1	52	9
<b>Fluorita</b>	2,88	0,25	16,6	67	16
<b>Hematita</b>	4,95	0,77	22,9	115	36
<b>Galena</b>	6,84	0,55	77,3	197	35

A figura 46 mostra um gráfico que relaciona a média do tom de cinza calculado versus a densidade das amostras. Quanto mais densa a amostra, maior o valor do seu tom de cinza.

O ajuste linear dos pontos é mostrado na figura 47. A equação teve um ajuste de 96,9 %, mostrando que o ajuste descreve bem o comportamento dos dados.

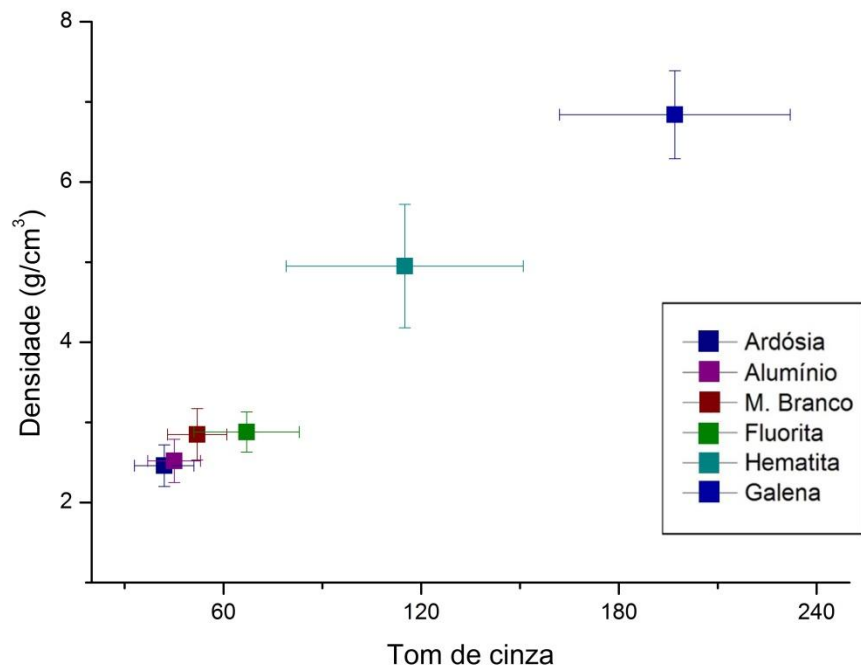


Figura 46 – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 100 kV.

Já a figura 48 mostra um gráfico das médias dos tons de cinza agora versus o número atômico efetivo de cada amostra. À medida que o número atômico aumenta a tonalidade de cinza também aumenta, isso para todas as amostras.

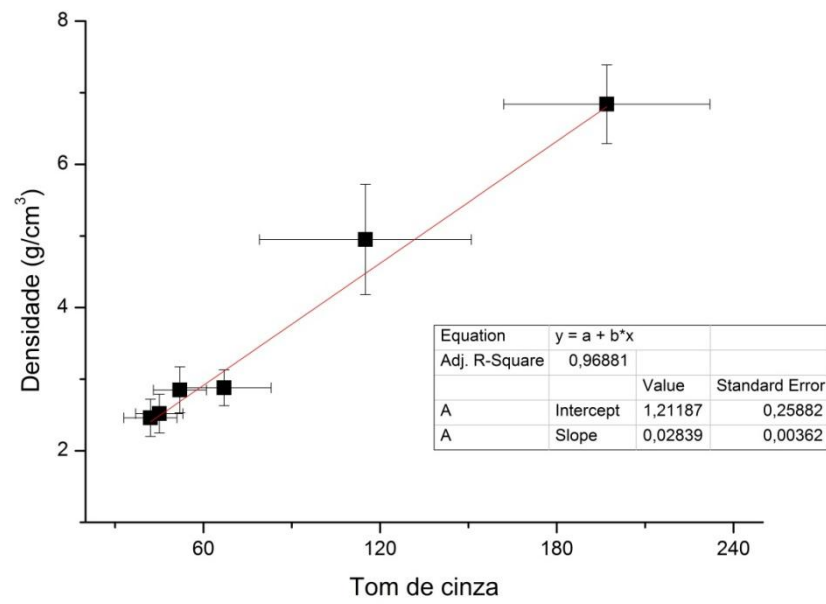


Figura 47 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 100 kV.

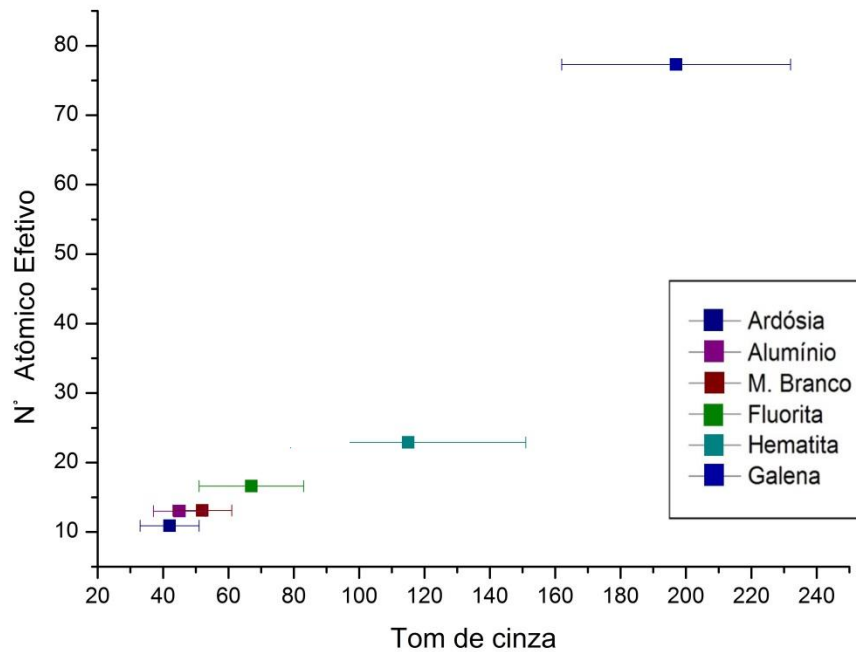


Figura 48 – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 100 kV.

A figura 49 mostra o ajuste linear dos pontos relacionando o número atômico efetivo em relação à densidade das amostras. Não é possível ajustar linearmente todos os dados. Por isso, a galena foi excluída. Nesse caso, o ajuste linear teve um  $R^2$  no valor de 96,5%.

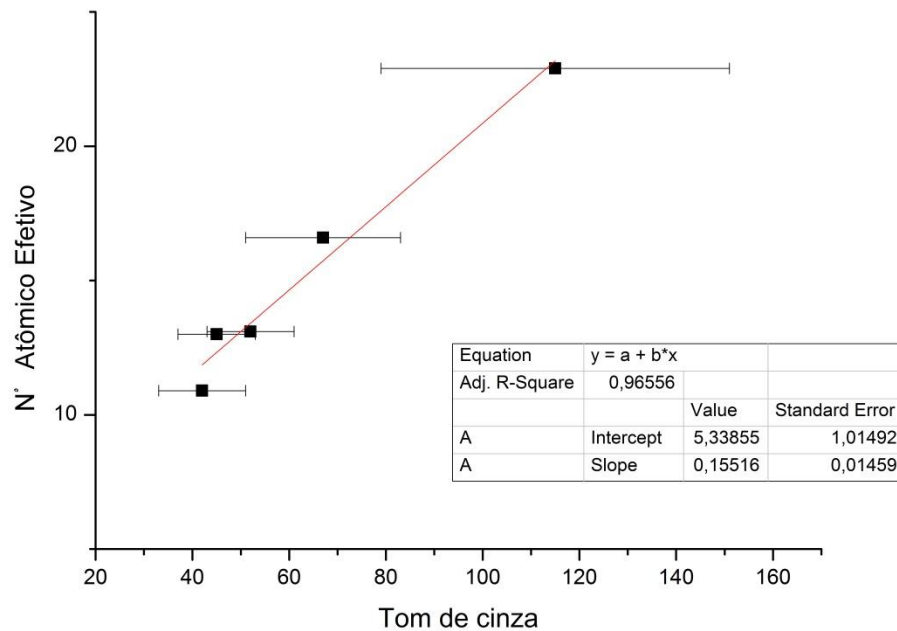


Figura 49 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 100 kV.

A tabela 15 mostra as equações de ajustes calculadas nas análises dos tons de cinza *versus* a densidade e *versus* o número atômico efetivo das amostras.

Tabela 15 – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 100kV.

	<b>Densidade x Tom de cinza</b>	<b>Número Atômico Efetivo x Tom de cinza</b>
<b>Equação</b>	$d = 1,21 + 0,03TC$	$Z_{ef} = 5,34 + 0,15TC$
	d= densidade da amostra $Z_{ef}$ = Número Atômico Efetivo TC= Tom de Cinza	

### 5.3 TODAS AS TENSÕES

A tabela 16 mostra os tons de cinza calculados para todas as tensões usadas, juntamente com as densidades e os números atômicos efetivos calculados para as amostras. As análises feitas para as outras tensões utilizadas se encontram no apêndice desse trabalho.

Tabela 16 - Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (50, 60, 70, 80, 90 e 100 kV).

<i>Amostras</i>	<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Z<sub>ef</sub></i>	<i>TC (50kV)</i>	<i>TC (60kV)</i>	<i>TC (70kV)</i>	<i>TC (80kV)</i>	<i>TC (90kV)</i>	<i>TC (100kV)</i>
<b>Ardósia</b>	2,46 ± 0,26	10,9	42 ± 8	45 ± 7	43 ± 7	40 ± 8	43 ± 7	42 ± 9
<b>Alumínio</b>	2,52 ± 0,27	13,0	46 ± 7	48 ± 5	45 ± 5	43 ± 7	46 ± 5	45 ± 8
<b>Mármore Branco</b>	2,85 ± 0,32	13,1	53 ± 9	51 ± 8	47 ± 7	49 ± 9	48 ± 7	52 ± 9
<b>Fluorita</b>	2,88 ± 0,25	16,6	69 ± 15	69 ± 12	71 ± 10	64 ± 14	71 ± 10	67 ± 16
<b>Hematita</b>	4,95 ± 0,77	22,9	85 ± 15	99 ± 20	104 ± 25	105 ± 30	108 ± 32	115 ± 36
<b>Galena</b>	6,84 ± 0,55	77,3	87 ± 17	104 ± 19	120 ± 21	146 ± 27	160 ± 28	197 ± 35

A figura 50 mostra os diferentes tons de cinza calculados para as amostras nas energias analisadas nesse trabalho.

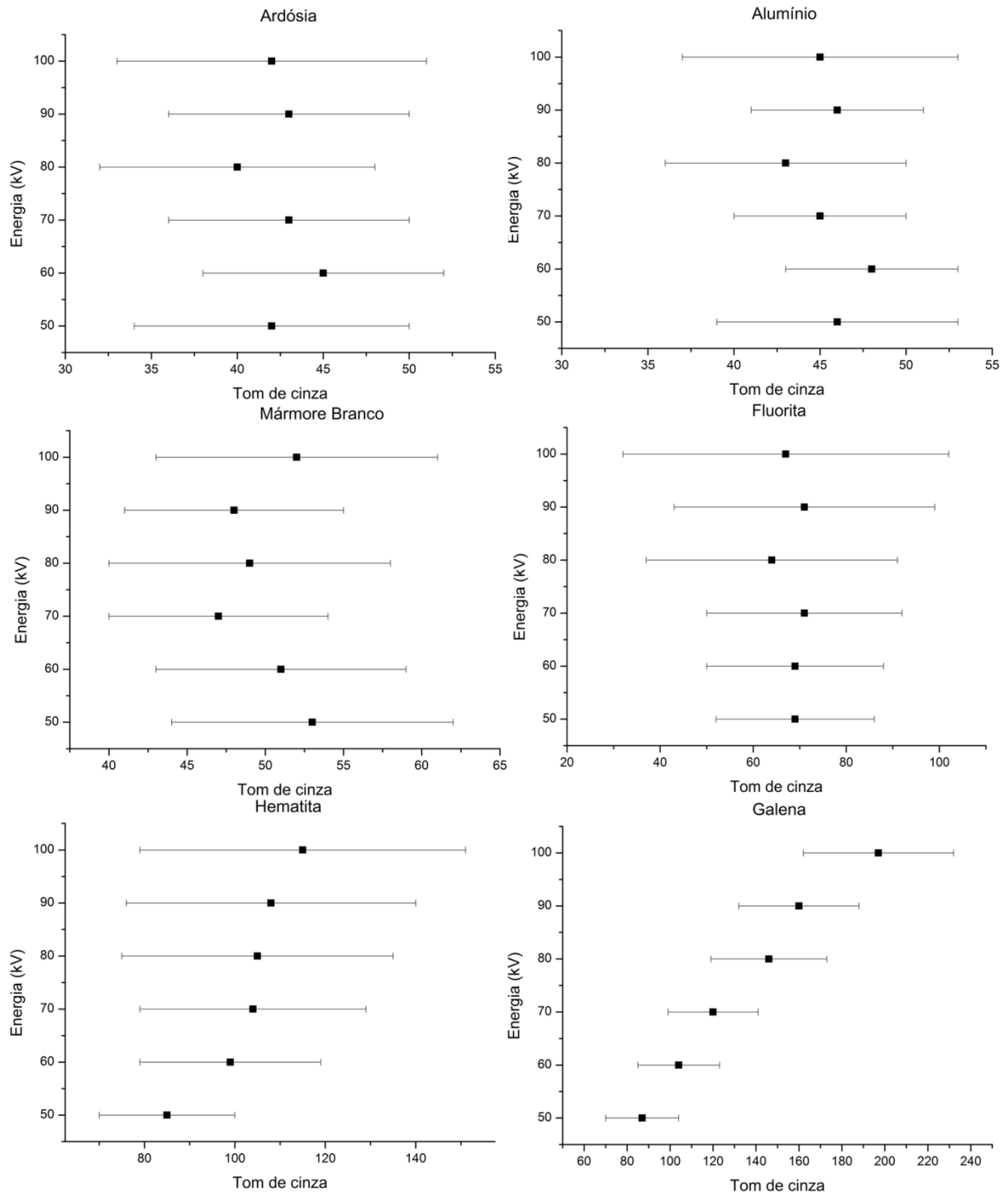


Figura 50 – Tom de cinza obtido para as amostras nas diferentes energias estudadas nesse trabalho.

Com relação aos tons de cinza obtidos para as amostras em relação às energias estudadas, pode-se observar que:

- Ardósia: O seu tom de cinza não teve uma grande variação à medida que a energia diminuía. O seu tom de cinza médio, nessas energias, variou de 40 a 45.
- Alumínio: Também não houve grandes variações de tonalidade, obtendo valores de 43 a 48.
- Mármore Branco: A variação do tom de cinza característico foi de 47 até 53, para as energias usadas.
- Fluorita: O tom médio de cinza característico, nesse caso, foi de 64 até 71, mostrando, assim, que a variação da tonalidade foi pequena.
- Hematita: Houve uma variação na tonalidade de 26%, caindo de 115 (100 kV) para 85 (50 kV).
- Galena: A variação do tom de cinza para a Galena foi grande, caindo de 197 (100 kV) para 87 (50 kV), uma variação de 56%!

Portanto, para as amostras de baixa densidade (ardósia, alumínio, mármore branco e fluorita), a variação da energia alterou muito pouco a média de tom cinza característico de cada uma. Já para as amostras mais densas (hematita e galena) observou-se uma diminuição no tom de cinza característico à medida que a energia diminuía. Isso não é uma surpresa, visto que, somando o fato de que as energias mais baixas são mais interagentes com a matéria e que os materiais mais densos absorvem mais radiação, essa queda era esperada.

A tabela 17 mostra as equações obtidas com o ajuste linear dos dados, relacionando o tom de cinza com a densidade e o número atômico efetivo para todas as energias estudadas, com seus respectivos coeficientes de determinação.

Tabela 17– Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para as energias estudadas.

	Densidade x Tom de cinza	R <sup>2</sup>	Número Atômico Efetivo x Tom de cinza	R <sup>2</sup>
<b>50 kV</b>	$d = 1,84 + 0,01TC^{(*)}$	0,70	$Z_{ef} = 0,04 + 0,26TC^{(**)}$	0,94
<b>60 kV</b>	$d = -0,19 + 0,05TC$	0,70	$Z_{ef} = 2,30 + 0,21TC^{(**)}$	0,98
<b>70 kV</b>	$d = 0,43 + 0,04TC$	0,74	$Z_{ef} = 4,20 + 0,18TC^{(**)}$	0,97
<b>80 kV</b>	$d = 0,74 + 0,04TC$	0,97	$Z_{ef} = 4,77 + 0,17TC^{(**)}$	0,93
<b>90 kV</b>	$d = 0,85 + 0,03TC$	0,89	$Z_{ef} = 4,51 + 0,17TC^{(**)}$	0,98
<b>100 kV</b>	$d = 1,21 + 0,03TC$	0,97	$Z_{ef} = 5,34 + 0,15TC^{(**)}$	0,96

d= densidade da amostra  $Z_{ef}$ = Número Atômico Efetivo TC= Tom de Cinza

(\*) sem a Hematita e Galena (\*\*) sem a Galena

As equações da tabela 17 relacionam o tom de cinza característico de uma amostra com a densidade e o número atômico efetivo da mesma. Essas equações se aplicam melhor em regiões de baixa densidade e de número atômico efetivo pequeno (menor que 23). Há a necessidade de buscar amostras com densidade entre 3 e 6 g/cm<sup>3</sup> e com números atômicos entre 20 e 70, para preencher as lacunas de informações e, assim, conseguir encontrar uma equação melhor ajustada à essa faixa de densidades e números atômicos efetivos.

#### 5.4 APLICAÇÕES DA METODOLOGIA

Para verificar a aplicabilidade da metodologia proposta, dois ensaios foram realizados com quatro amostras (amazonita, gabro, arenito e sodalita). Duas amostras por vez foram inseridas dentro do porta-amostra e medidas para se obter os valores médios do tom de cinza das mesmas. Em função da reta de calibração, os valores das densidades e dos números atômicos efetivos das amostras foram

comparados com os valores das densidades medidas gravimetricamente (para a densidade) e teoricamente (para o número atômico efetivo).

#### 5.4.1 Amazonita e Gabro

Juntamente com as demais amostras usadas nesse trabalho, uma amostra de amazonita e outra de gabro foram medidas na tensão de 80 kV. Os parâmetros de reconstrução usados para essas amostras foram os mesmos que foram utilizados para as amostras dos itens anteriores. A figura 51 mostra uma fatia de cada amostra reconstruída com esses parâmetros. Já a tabela 18 mostra os tons médios de cinza obtidos nesse ensaio.

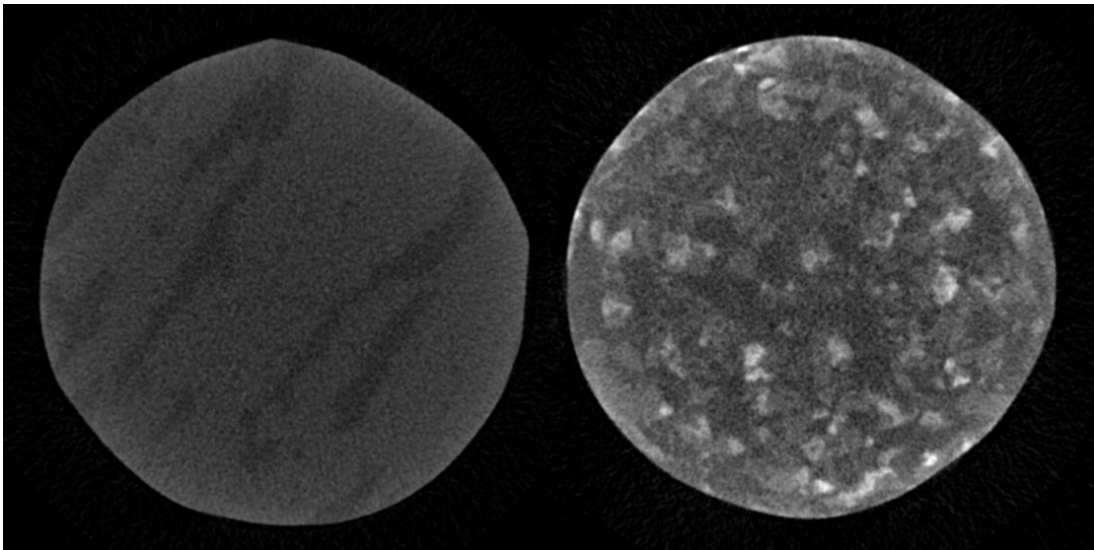


Figura 51 – Fatias reconstruídas utilizando os parâmetros da fluorita em 100 kV para a amazonita (esquerda) e gabro (direita).

Tabela 18– Médias dos tons de cinza para as amostras com amazonita e gabro (80kV).

<b>Amostras</b>	<b>Tom de Cinza</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Ardósia</b>	47	6
<b>Amazonita</b>	50	7
<b>Alumínio</b>	53	7
<b>Mármore Branco</b>	60	7
<b>Fluorita</b>	70	13
<b>Gabro</b>	75	19
<b>Hematita</b>	124	32

A figura 52 mostra o gráfico relacionando o tom médio de cinza das amostras e as suas densidades, sem considerar os dados referentes à amazonita e ao gabro. Já na figura 53 está mostrado o ajuste linear obtido nessa situação. Nas figuras 54 e 55, estão os gráficos relacionados ao tom médio de cinza *versus* o número atômico efetivo.

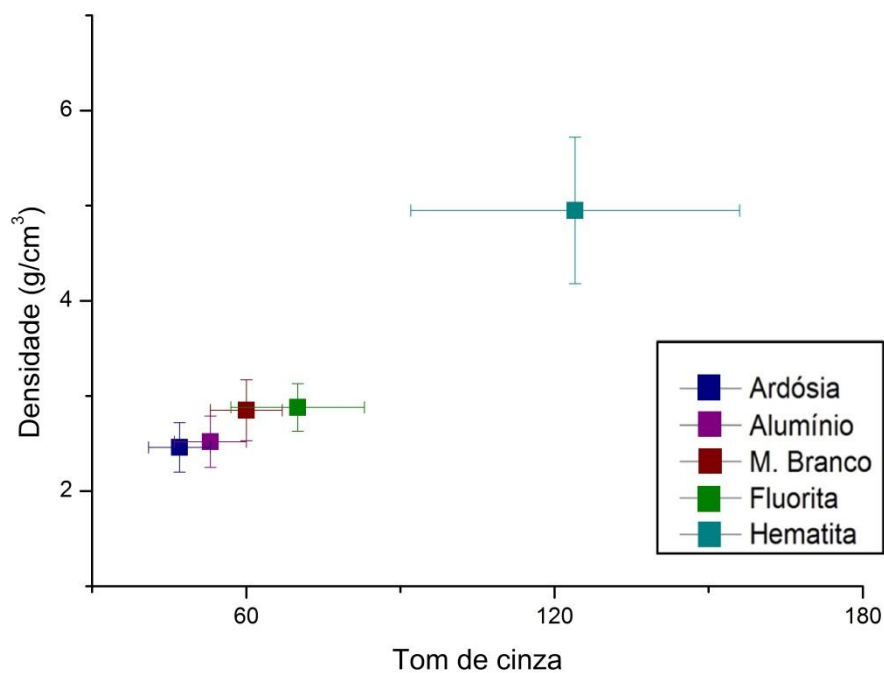


Figura 52 – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para o caso da amazonita e gabro (80 kV).

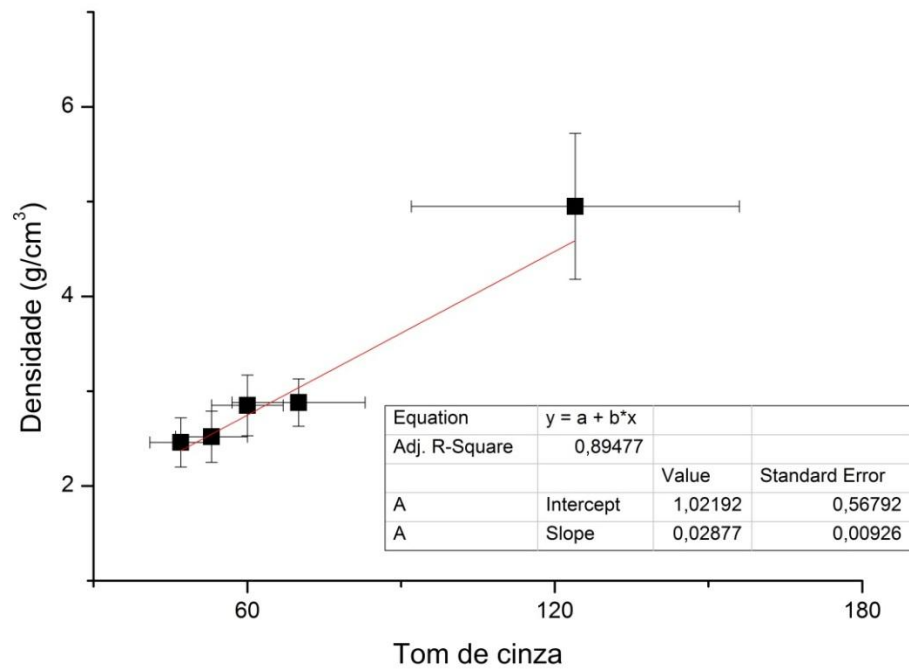


Figura 53 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para o caso da amazonita e gabro (80kV).

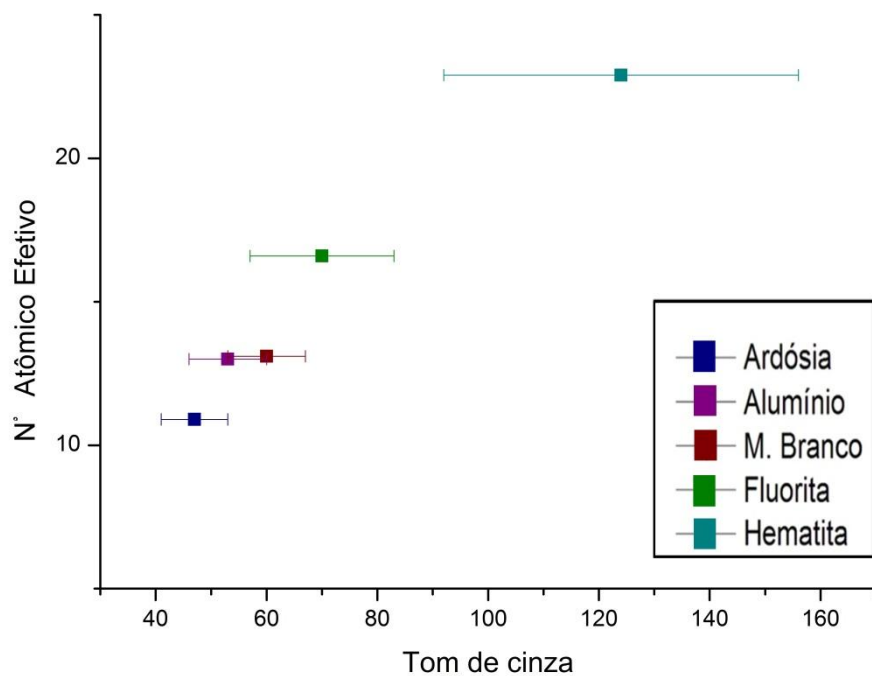


Figura 54 – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para o caso amazonita e gabro (80 kV).

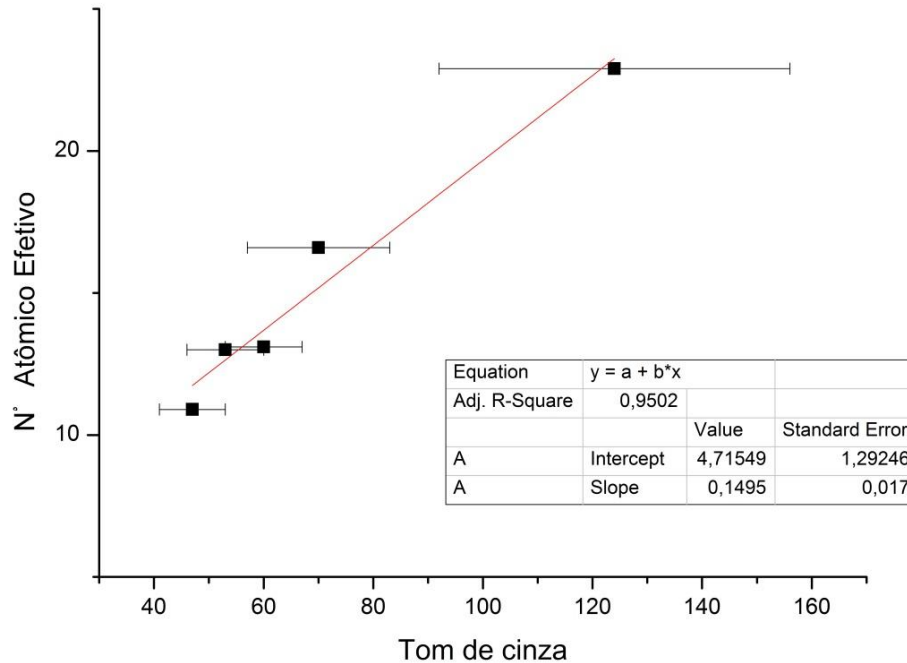


Figura 55 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para o caso amazonita e gabro (80 kV).

O cálculo da densidade das amostras foi feito gravimetricamente; já para o número atômico efetivo foi feito teoricamente utilizando as composições químicas das amostras. A tabela 19 mostra a composição química da amazonita e do gabro.

Tabela 19 – Composição química das amostras amazonita e gabro.

Amostras	Composição Química
Amazonita	$\text{KAISi}_3\text{O}_8$
Gabro	$\text{SiO}_2$ (50%); $\text{Al}_2\text{O}_3$ (20%); $\text{CaO}$ (10 %); $\text{MgO}$ (10%); $\text{FeO}$ (10%)

A tabela 20 mostra a comparação dos resultados obtidos através do ajuste linear e através dos métodos experimental (densidade) e teórico (número atômico efetivo).

Tabela 20 – Comparação entre os resultados obtidos e os resultados encontrados pelo ajuste linear para o caso da amazonita e gabro (80kV). Os intervalos apresentados correspondem a um desvio padrão.

<b>DENSIDADE</b>				
<b>Amostras</b>	<b>Densidade Gravimétrica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Intervalo da densidade Gravimétrica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade pela micro-CT (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Intervalo da densidade pela micro-CT (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Amazonita</b>	2,47	2,23 – 2,71	2,46	1,43 – 3,50
<b>Gabro</b>	3,03	2,84 – 3,22	3,18	1,92 – 4,44

<b>NÚMERO ATÔMICO EFETIVO</b>			
<b>Amostras</b>	<b>Z<sub>ef</sub> teórico</b>	<b>Z<sub>ef</sub> pela micro-CT</b>	<b>Intervalo do Z<sub>ef</sub> pela micro-CT</b>
<b>Amazonita</b>	13,0	12,2	10,0 – 14,3
<b>Gabro</b>	14,6	15,9	13,4 – 18,5

Pela tabela 20, nota-se que os valores das densidades para as amostras obtidos via ajuste linear dos pontos são consistentes com os valores experimentais. O mesmo ocorre para o número atômico efetivo.

#### 5.4.2 Arenito e Sodalita

Outro ensaio realizado para verificar a aplicabilidade dessa metodologia foi realizando com amostras de arenito e sodalita medidas em duas energias, 80 e 100 kV. Os parâmetros de reconstrução usados para essas amostras também foram os

mesmos utilizados nas amostras anteriores. A figura 56 mostra uma fatia de cada amostra reconstruída com esses parâmetros (nesse caso é mostrado as fatias na energia de 100 kV). Já a tabela 21 mostra os tons médios de cinza obtidos nesse ensaio para as duas energias.

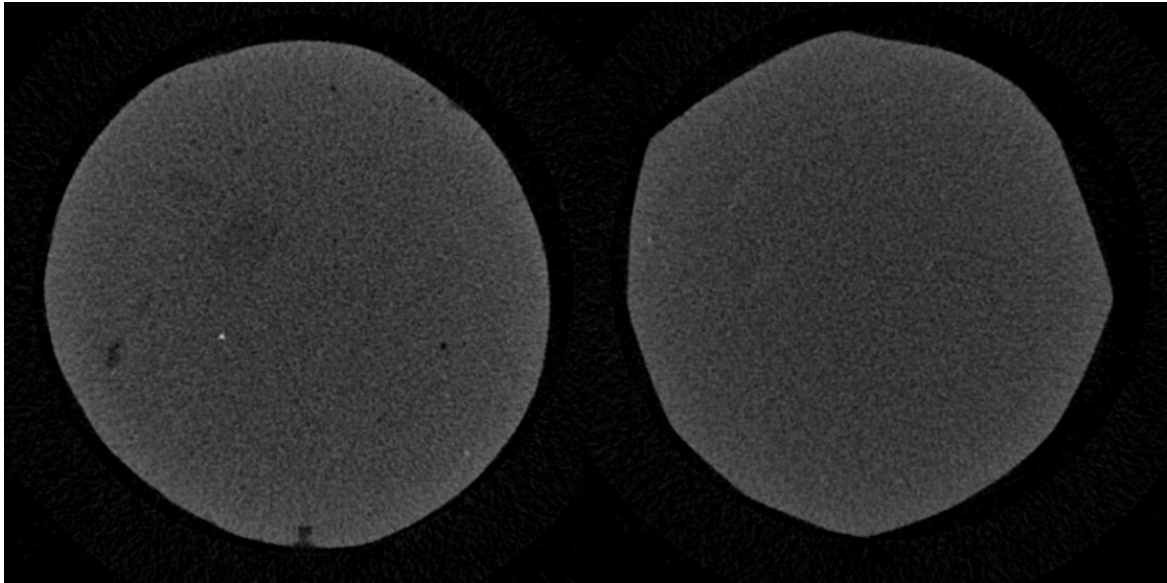


Figura 56 – Fatias reconstruídas utilizando os parâmetros da fluorita em 100 kV para a arenito (esquerda) e sodalita (direita) também em 100 kV.

Pela tabela, percebe-se que os tons de cinza não variaram muito nas duas energias estudadas (para apenas uma amostra a variação foi de nove tons de cinza). Por isso apenas os dados referentes à energia de 100 kV foram analisados. A figura 57 mostra o gráfico relacionando o tom médio de cinza das amostras e as suas densidades, sem considerar os dados referentes ao arenito e a sodalita. Já na figura 58 está mostrado o ajuste linear obtido para esse ensaio. Nas figuras 59 e 60, estão os gráficos relacionados ao tom médio de cinza *versus* o número atômico efetivo.

Tabela 21– Médias dos tons de cinza para as amostras com arenito e sodalita nas energias de 80 e 100 kV.

<b>Amostras</b>	<b>80 kV</b>		<b>100 kV</b>	
	<b>Tom de Cinza</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Tom de Cinza</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Arenito</b>	50	8	51	8
<b>Sodalita</b>	54	7	53	7
<b>Ardósia</b>	63	8	63	9
<b>Alumínio</b>	70	7	69	7
<b>Mármore</b>	81	10	79	10
<b>Branco</b>	101	17	98	17
<b>Hematita</b>	155	40	164	44

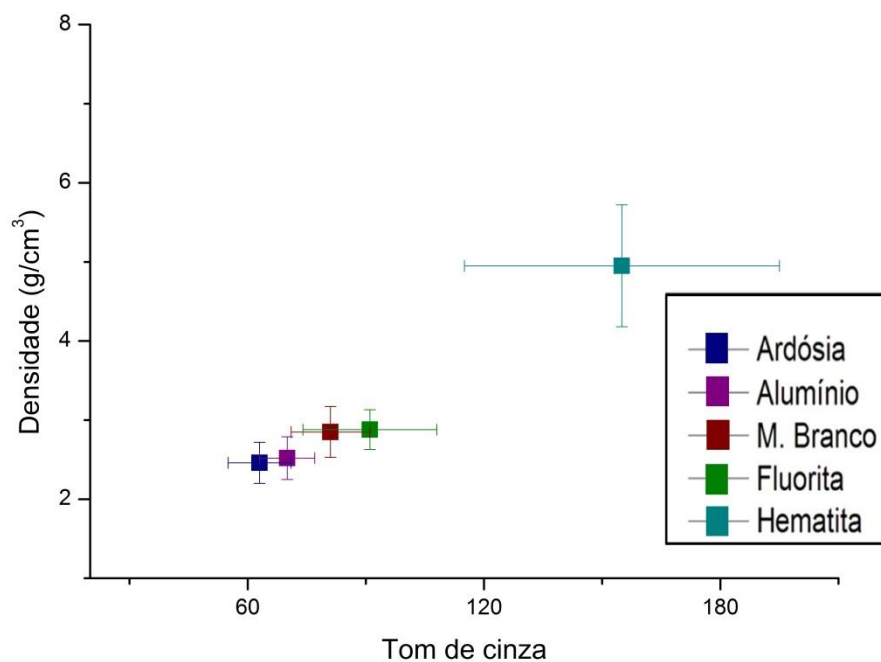


Figura 57 – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para o caso do arenito e sodalita (100 kV).

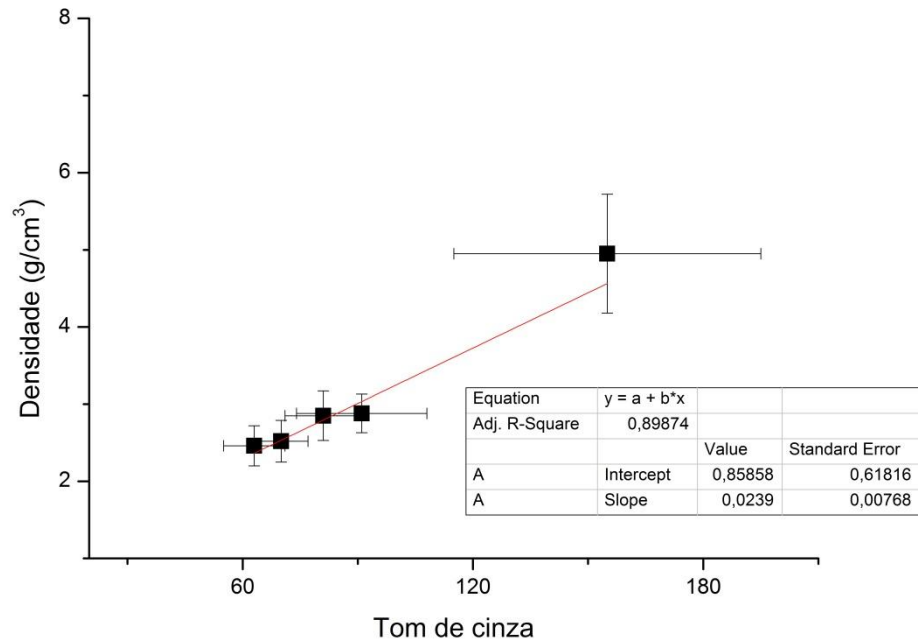


Figura 58 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para o caso do arenito e sodalita (100kV).

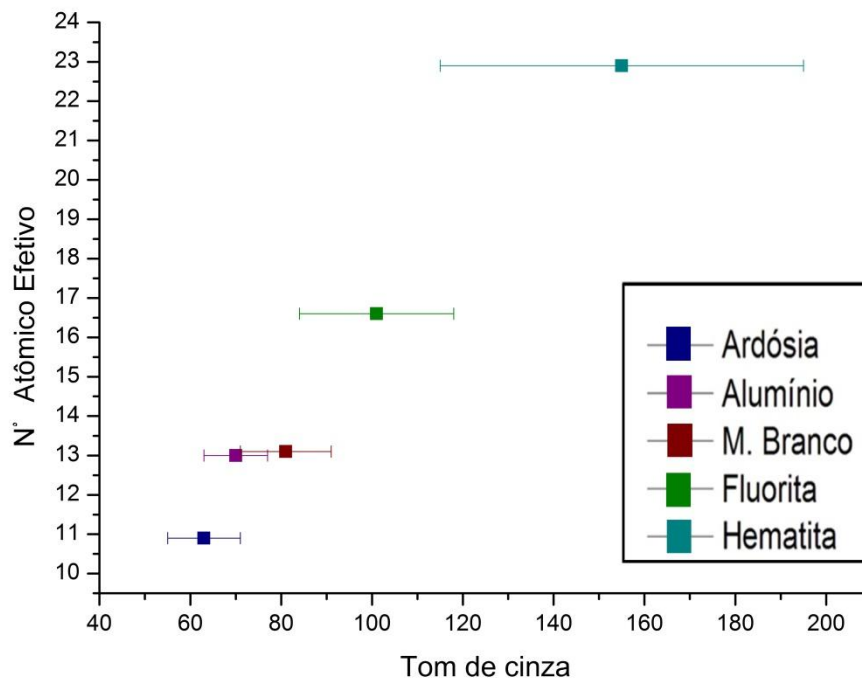


Figura 59 – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para o caso do arenito e sodalita (100 kV).

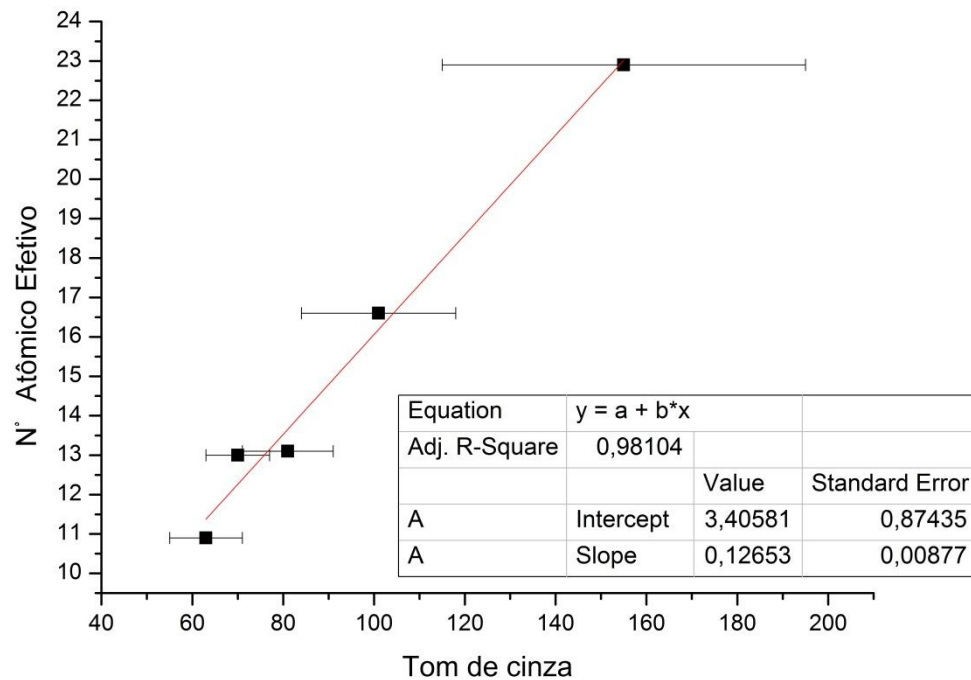


Figura 60 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para o caso do arenito e sodalita (100 kV).

O cálculo da densidade das amostras foi feito gravimetricamente; já para o número atômico efetivo foi feito teoricamente utilizando as composições químicas das amostras. A tabela 22 mostra a composição química do arenito e da sodalita usadas nesse trabalho.

Tabela 22 – Composição química das amostras arenito e sodalita.

Amostras	Composição Química
Arenito	SiO <sub>2</sub> (95%); Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2%); Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2%); Na <sub>2</sub> O (1%)
Sodalita	Na <sub>4</sub> (SiAlO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl

A tabela 23 mostra a comparação dos resultados obtidos através do ajuste linear e através dos métodos experimental (densidade) e teórico (número atômico efetivo).

Tabela 23 – Comparação entre os resultados obtidos e os resultados encontrados pelo ajuste linear para o caso do arenito e da sodalita (100kV). Os intervalos apresentados correspondem a um desvio padrão.

<b>DENSIDADE</b>				
<b>Amostras</b>	<b>Densidade Gravimétrica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Intervalo da densidade Gravimétrica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade pela micro-CT (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Intervalo da densidade pela micro-CT (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Arenito</b>	1,86	1,65 – 2,07	2,07	1,08 – 3,09
<b>Sodalita</b>	2,22	2,00 – 2,44	2,12	1,10 – 3,15

<b>NÚMERO ATÔMICO EFETIVO</b>			
<b>Amostras</b>	<b>Z<sub>ef</sub> teórico</b>	<b>Z<sub>ef</sub> pela micro-CT</b>	<b>Intervalo do Z<sub>ef</sub> pela micro-CT</b>
<b>Arenito</b>	12,0	9,8	8,5 – 11,2
<b>Sodalita</b>	11,7	10,1	8,8 – 11,4

Pela tabela 23, nota-se que os valores das densidades para as amostras obtidos via ajuste linear dos pontos coincidem com os valores experimentais quando leva-se em conta o intervalo dos valores obtidos experimentalmente para a densidade. Porém o mesmo não ocorre com o número atômico efetivo; os valores teóricos só coincidem com os valores obtidos pela reta quando se leva em conta o intervalo obtido pela reta mais o intervalo do desvio padrão dos tons de cinza das duas amostras. Assim, o valor máximo do número atômico do arenito é de 12,3 e da sodalita é de 12,4. Apenas unindo esses dois intervalos – o do tom de cinza e o

intervalo do ajuste da reta, os valores se superpõem. Vale comentar que essas duas amostras foram escolhidas para a mesma medida, pois ambos os tons de cinza médios característicos dessas amostras estão fora do intervalo dos tons de cinza das amostras tidas como padrão. Isso foi feito para verificar a aplicabilidade da metodologia em caracterizar amostras em que o tom de cinza característico esteja fora do intervalo de tons de cinza das amostras-padrão (extrapolação). Desta forma, já era de se esperar que a sistemática não funcionasse tão bem como para as amostras do item 5.9.1 (interpolação).

Por outro lado, a composição química das amostras, tiradas da literatura, pode não ser exatamente a composição real das amostras utilizadas. Além disso, não foi considerada a parte porosa das amostras. Isso pode afetar as comparações entre os números atômicos efetivos teóricos e os obtidos via micro-CT.

## 6. CONCLUSÕES

Nesse trabalho verificou-se que há diferenças em se realizar tomografias com apenas um escaneamento e com vários escaneamentos. Quando se realiza vários escaneamentos, os tons de cinza são sempre normalizados para as amostras da medida, impossibilitando a análise linear entre os tons de cinza e as densidades e números atômicos efetivos das amostras.

Também se mostrou ser inviável para esse tipo de análise a otimização dos parâmetros de reconstrução das amostras de forma independente. Apenas é possível fazer a análise linear quando se utiliza apenas um parâmetro de reconstrução para as amostras.

Dentre as amostras utilizadas nesse trabalho a fluorita foi escolhida como amostra-base, através de estudos dos coeficientes de determinação de três amostras (ardósia, fluorita e hematita) e do contraste das imagens. A energia de 100 kV foi escolhida como base pois era a que possuía um bom contraste na imagens da fluorita e um perfil de transmissão melhor do que a obtida na energia de 50 kV.

Foi verificado ser possível obter um ajuste linear relacionando as densidades e números atômicos efetivos das amostras em relação ao seu tom médio de cinza, obtidos através das imagens microtomográficas em diferentes energias. Os ajustes lineares obtidos foram bons, com coeficientes de determinação entre 0,70 e 0,98 e coeficientes angulares com desvios entre 7,4 e 35 %.

Os tons médios de cinza característicos de amostras de baixa densidade não sofreram grandes variações à medida que a energia dos raios X diminuía. Já para amostras de alta densidade, essa variação chegou a 56%, no caso da galena.

Pelo ajuste linear dos dados foi possível determinar a densidade e o número atômico efetivo da amazonita e do gabro quando comparados com os intervalos dos valores obtidos experimentalmente (densidade) e teóricos (número atômico efetivo).

Os dados referentes às densidades do arenito e sodalita obtidos através do ajuste linear coincidem com os valores das densidades calculadas experimentalmente, levando em conta o intervalo de valores obtidos pelo ajuste linear. Já os valores dos números atômicos efetivos dessas amostras coincidem com os valores calculados teoricamente quando se leva em conta o intervalo de valores obtidos pelo ajuste e também o desvio padrão do tom de cinza dessas amostras.

Verificou-se a necessidade de buscar amostras com densidades entre 3 e 6 g/cm<sup>3</sup> com números atômicos entre 20 e 70 para completar o conjunto de dados obtidos para entender melhor a relação dessas grandezas e o tom médio de cinza.

Também há a necessidade de diminuir o desvio padrão dos tons de cinza nos resultados, a fim de melhorar a acurácia dessa metodologia. Para diminuir o desvio nos valores de tons de cinza para cada material, causados pela variabilidade das amostras naturais utilizadas, pretende-se preparar pastilhas de material homogêneo com pós de óxidos de vários elementos (no intervalo de número atômico adequado) para reproduzir o intervalo de números atômicos efetivos e densidades de interesse.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LUCIA, F. J. (2007). Carbonate Reservoir Characterization. Berlim: Springer-Verlag.
- [2] LUQUOT, L., & GOUZE, P. (2009). Experimental determination of porosity and permeability changes induced by injection of CO<sub>2</sub> into carbonate rocks. *Chemical Geology* , 265, 148–159.
- [3] MALIVA, R. G., MISSIMER, T. M., CLAYTON, E. A., & DICKSON, J. A. (2009). Diagenesis and porosity preservation in Eocene microporous limestones, South Florida, USA. *Sedimentary Geology* , 217, 85–94.
- [4] SILVA, A. C., LOISY, C., CEREPÍ, A., TOULLEC, R., KIEFER, E., HUMBERT, L., et al. (2009). Variations in stratigraphic and reservoir properties adjacent to the Mid-Paleocene sequence boundary, Camposection, Pyrenees, Spain. *Sedimentary Geology* , 219, 237–251.
- [5] TSAKIROGLOU, C. D., IOANNIDIS, M. A., AMIRTHARAJ, E., & VIZIKA, O. (2009). A new approach for the characterization of the pore structure of dual porosity rocks. *Chemical Engineering Science* , 64, 847--859.
- [6] FELDKAMP, L. A., DAVES, L. C., & KRESS, J. W. (1984). Practical cone-beam algorithm. *Journal of the Optical Society of America A* , 1 (6), 612-619.
- [7] GEET, M. V., SWENNEN, R., & WEVERS, M. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocuss X-ray computerised tomography. *Sedimentary Geology*, v. 132, 25-36, 2000.
- [8] REMEYSEN, K., & SWENNEN, R. Application of microfocuss computed tomography in carbonate reservoir characterization: Possibilities and limitations. *Marine and Petroleum Geology* 25 (2008) 486–499
- [9] TAPLEE, M. F. V., & CORPS, N. Acquiring optimal quality X-ray  $\mu$ CT scans. *Micro-CT User Meeting*, p. 93-100, 2009.
- [10] KOROTEEV, D., MUTINA, A., & SASOV, A. Using X-ray microCT for 3D mineral mapping. *Micro-CT User Meeting*, 2011.
- [11] NADEEV, A., MIKHAILOV, D., CHUVILIN, E., KOROTEEV, D., SHAKO, V. Visualization of phases inside porous medium with X-ray microCT. *Micro-CT User Meeting*, 2012.

- [12] OLIVEIRA, L. F. Tomografia Computadorizada Tridimensional por Transmissão de Raios X na Análise e Caracterização de Objetos Volumétricos. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro -COPPE - Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- [13] LEO, W. R. Technique for nuclear and particle physics experiments. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2ª ed., 378 p., 1994.
- [14] KAPLAN, I. Física nuclear. Editora Guanabara Dois S.A., 2ª ed., Rio de Janeiro, RJ, 633 p., 1978.
- [15] APPOLONI, C. R.; MELQUIADES, F. L. Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria – Texto Experimental para a Disciplina de Física Nuclear. Universidade Estadual de Londrina, PR, 1997.
- [16] LEIGHTON, R. B. Principles of Modern Physics. McGraw-Hill, 1959.
- [17] KALENDER, W. A. Computed Tomography - Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications. 2ª ed., Publicis Coporate Publishing, Alemanha, 2005.
- [18] NAGATA, R. Determinação das propriedades microestruturais de espumas industriais de SiC por transmissão de raios gama e microtomografia de raios X. Dissertação de mestrado – Universidade estadual de Londrina - Londrina – PR, 2010.
- [19] FERNANDES, J. S. Caracterização microestrutural do espaço poroso De rochas reservatório da bacia do rio tibagi por Microtomografia de raios x. Tese de doutorado – Universidade estadual de Londrina – Londrina – PR, 2009.
- [20] MARQUES, L. C. Estudo da Porosidade de Arenitos Sintéticos por Técnicas Nucleares não Destrutivas. Dissertação de Mestrado, Dep. de Física, LFNA/UEL - Universidade Estadual de Londrina, PR, 127 p., 2008.
- [21] GULLBERG, G. T.; et al. An attenuated projector-backprojector for iterative SPECT reconstruction. Phys. Med. Biol., v. 30, pp. 799-816, 1986.
- [22] KAK, A. & SLANEY, M. Principles of computerized tomographic imaging - *IEEE Press*. Electronic Copy (c) 1999.
- [23] KETCHAM, R. A. and CARLSON, W. D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. Computers & Geosciences, v. 27, pp. 381-400, 2001.
- [24] MURTY, R. C. Effective Atomic Numbers of Heterogeneous Materials. Nature V. 207, 398-399 (1965).

- [25] SKYSCAN. Desktop X-ray microtomograph, Instruction manual – SkyScan 1172 N. V., Vluchtenburgstraat 3C, Belgium, 2005.
- [26] VINEGAR, H. J. & WELLINGTON, S. L. - Tomographic Imaging of Three-Phase Flow Experiments - *Rev. Sci. Instrum.* - v. 58 - no 1, p. 96 – 107, 1987.

## APÊNDICES

## A.1 TENSÃO DE 50 kV

A tabela 24 mostra, além das densidades e números atômicos efetivos calculados para as amostras, os tons de cinza característicos e os seus desvios padrões, para 50 kV.

Tabela 24 – Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (50 kV).

<i>Amostras</i>	<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Erro</i>	<i>Número Atômico Efetivo</i>	<i>Tom de Cinza</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<b>Ardósia</b>	2,46	0,26	10,9	42	8
<b>Alumínio</b>	2,52	0,27	13,0	46	7
<b>Mármore Branco</b>	2,85	0,32	13,1	53	9
<b>Fluorita</b>	2,88	0,25	16,6	69	15
<b>Hematita</b>	4,95	0,77	22,9	85	15
<b>Galena</b>	6,84	0,55	77,3	87	17

O gráfico relacionando as densidades das amostras e o seu tom de cinza característico está mostrado na figura 61. Nela observa-se que só é possível traçar uma reta para as amostras com uma densidade menor que 4 g/cm<sup>3</sup>. O ajuste linear é feito, desses pontos, na figura 62. Nele, o ajuste encontrado obteve um R<sup>2</sup> de 70,8%, indicando que esse ajuste não explica bem a distribuição dos dados. Ocorre que, nessa tensão, a energia efetiva do feixe já é suficientemente baixa para que o efeito Fotoelétrico seja importante e comprometa um ajuste linear dos dados considerados.

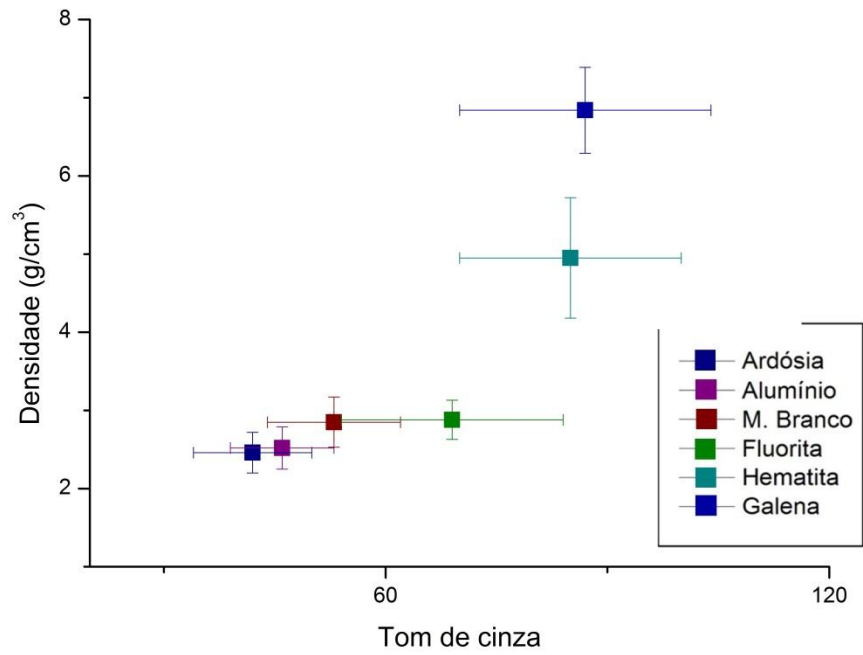


Figura 61 – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 50 kV.

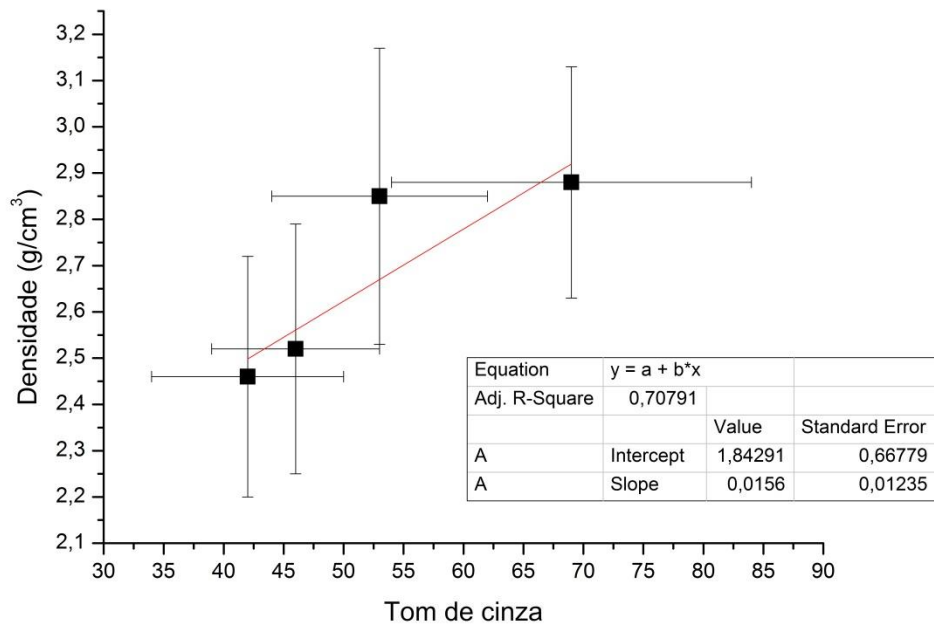


Figura 62 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 50 kV.

A figura 63 mostra o gráfico dos tons de cinza das amostras para essa energia em relação aos números atômicos efetivos.

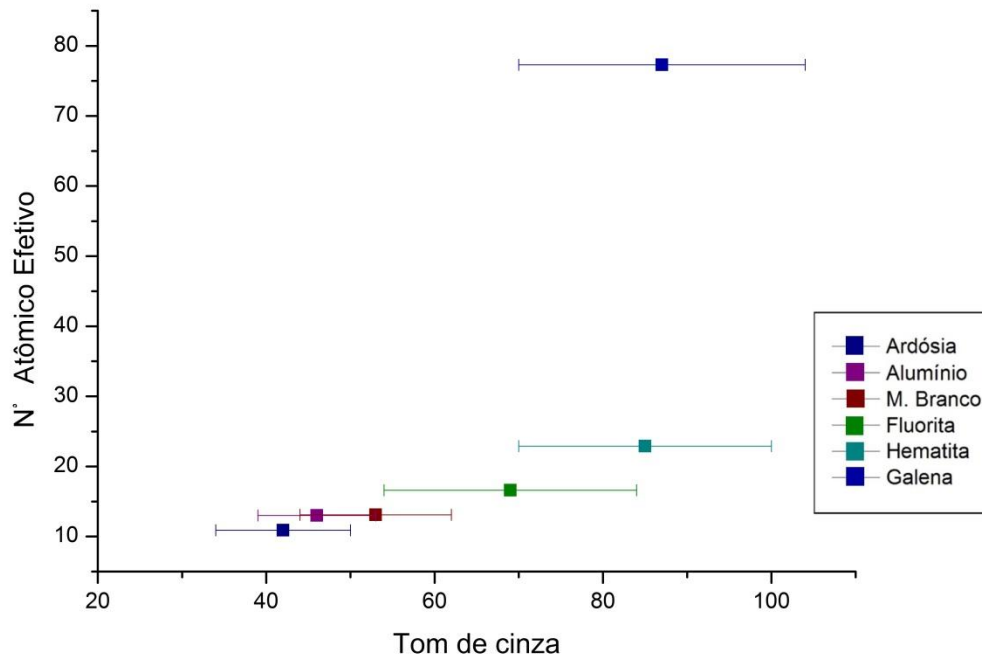


Figura 63 – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos, em escala linear, para 50 kV.

Pela figura 63, observa-se que se pode traçar uma reta de ajuste dos pontos se a galena for excluída. Se isso é feito, a figura 64 mostra a reta ajustada aos dados. O  $R^2$  nesse caso ficou em 94%, descrevendo relativamente bem o comportamento linear entre o tom de cinza e o número atômico efetivo.

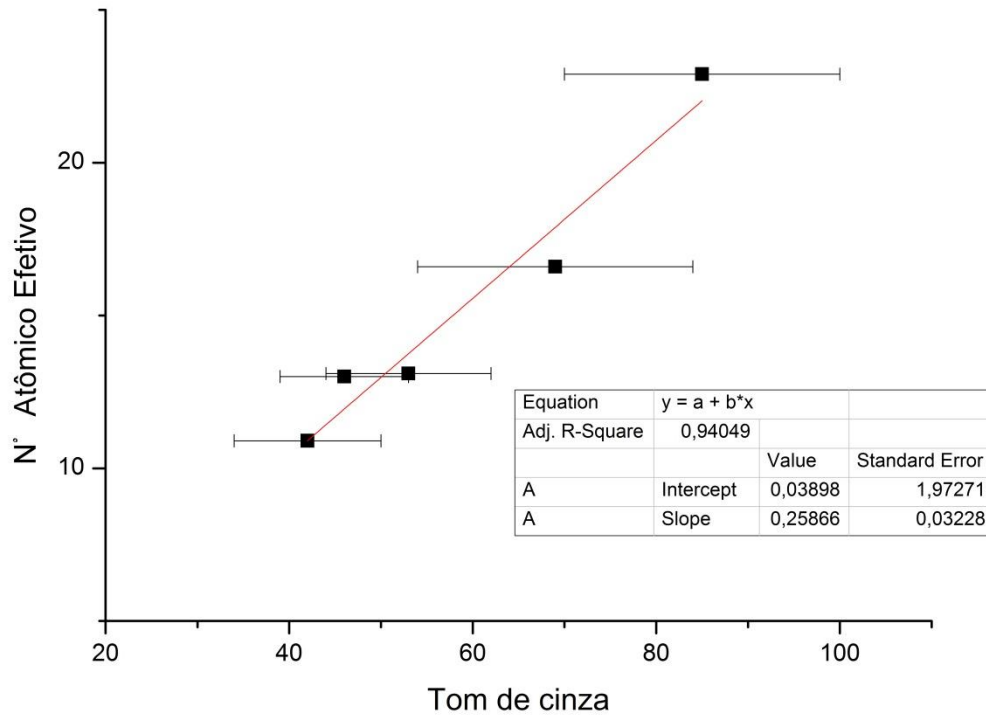


Figura 64 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 50 kV.

A tabela 25 mostra as equações de ajustes calculadas nas análises dos tons de cinza *versus* a densidade e *versus* o número atômico efetivo das amostras para a tensão de 50 kV.

Tabela 25 – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 50kV.

	<b>Densidade x Tom de cinza</b>	<b>Número Atômico Efetivo x Tom de cinza</b>
<b>Equação</b>	$d = 1,84 + 0,01TC$	$Z_{ef} = 0,04 + 0,26TC$
	d= densidade da amostra $Z_{ef}$ = Número Atômico Efetivo    TC= Tom de Cinza	

## A.2 TENSÃO DE 60 kV

A tabela 26 mostra as médias dos tons de cinza obtidos para as amostras na energia de 60 kV, relacionando-os com suas densidades e números atômicos efetivos.

Tabela 26 – Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (60 kV).

<i>Amostras</i>	<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Erro</i>	<i>Número Atômico Efetivo</i>	<i>Tom de Cinza</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<b>Ardósia</b>	2,46	0,26	10,9	45	7
<b>Alumínio</b>	2,52	0,27	13,0	48	5
<b>Mármore Branco</b>	2,85	0,32	13,1	51	8
<b>Fluorita</b>	2,88	0,25	16,6	69	12
<b>Hematita</b>	4,95	0,77	22,9	99	20
<b>Galena</b>	6,84	0,55	77,3	104	19

A figura 65 mostra o gráfico relacionando os tons médios de cinza das amostras com suas densidades. Já a figura 66 mostra o ajuste linear dos dados (sem os pontos da hematita e da galena). O ajuste nesse caso teve um  $R^2=69,79\%$ , mostrando que o ajuste linear descreve razoavelmente bem a distribuição dos pontos. Já na figura 67 está mostrado os tons médios de cinza em relação aos números atômicos efetivos das amostras. Na figura 68 um ajuste linear é feito (excluindo a galena), obtendo um coeficiente de determinação de  $98,31\%$ , que indica que a reta descreve bem os pontos.

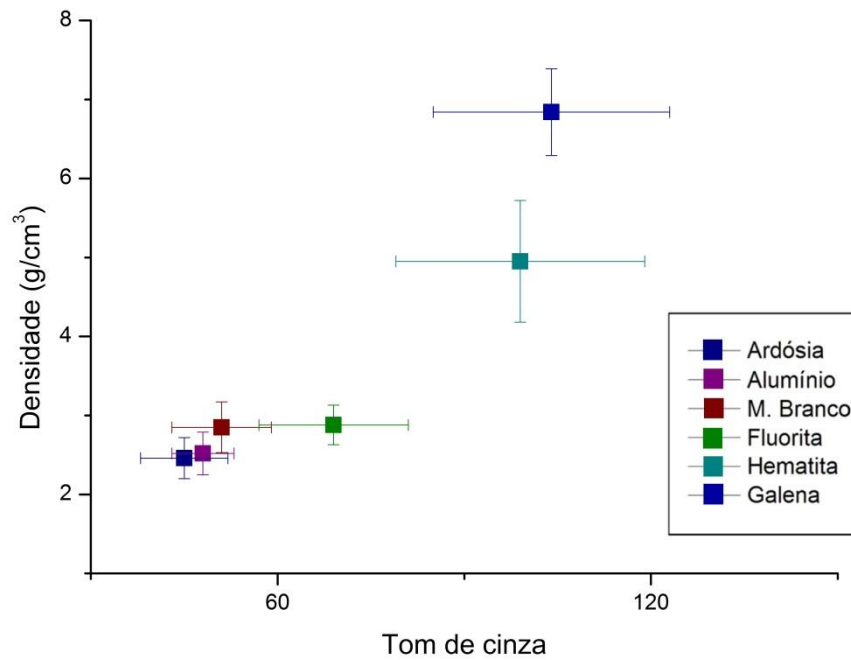


Figura 65 – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 60 kV.

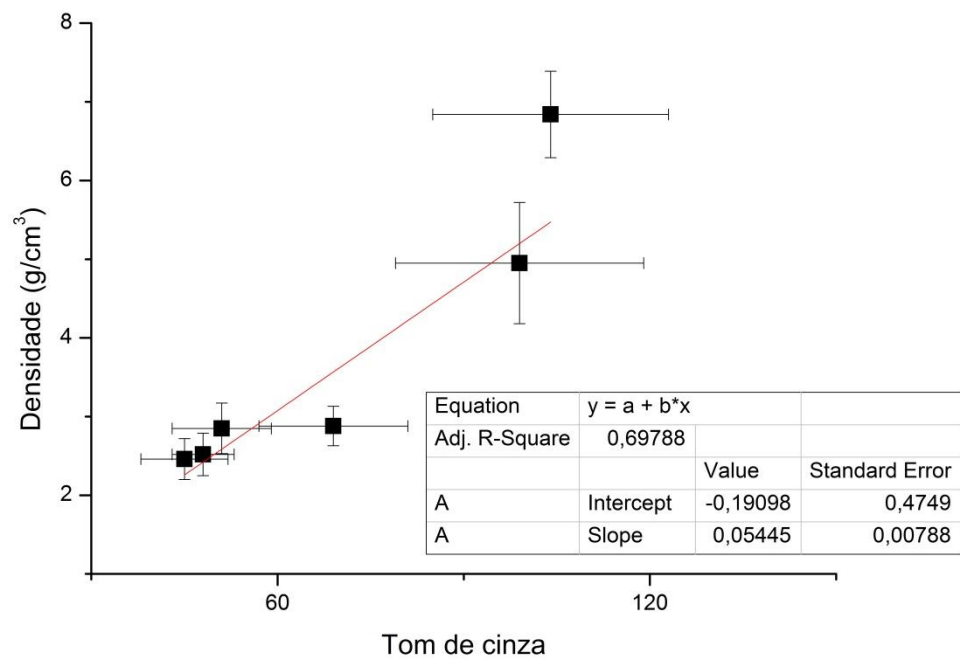


Figura 66 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 60 kV.

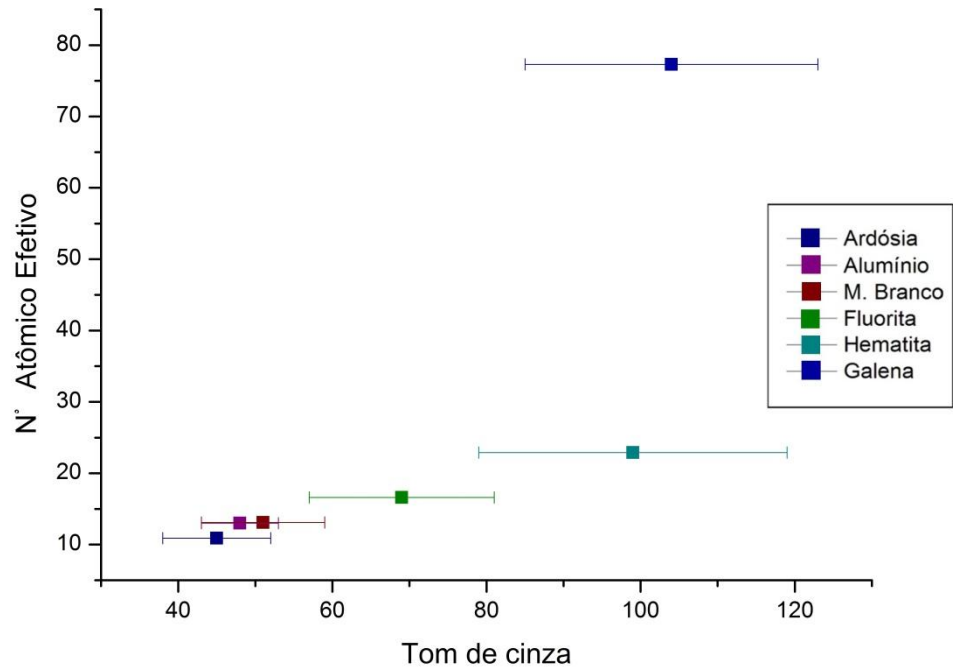


Figura 67 – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 60 kV.

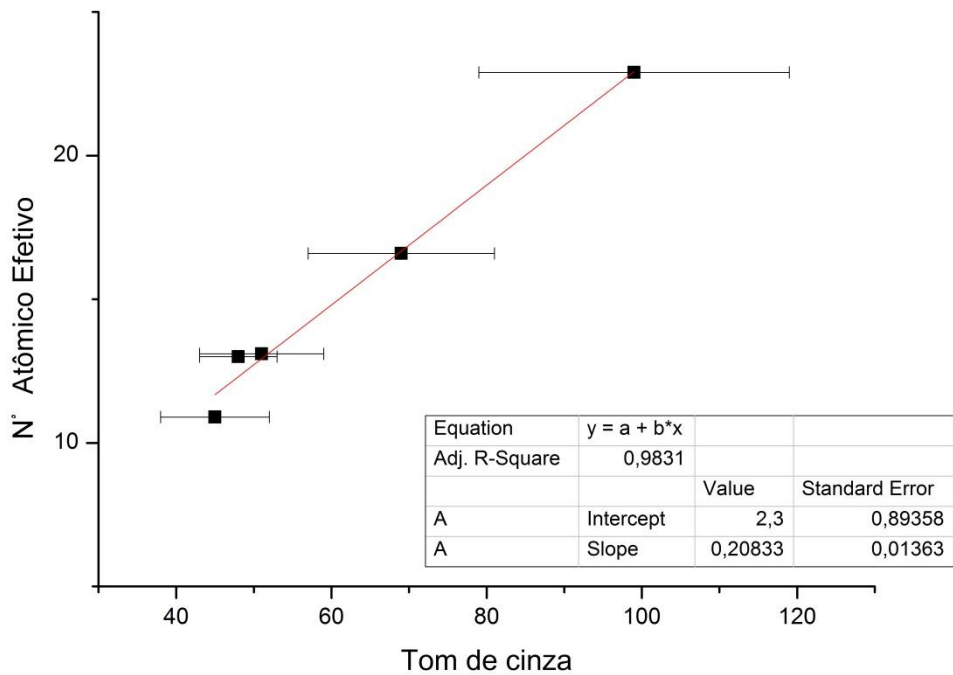


Figura 68 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 60 kV.

A tabela 27 mostra as equações obtidas pelo ajuste linear dos gráficos que relacionam o tom médio de cinza das amostras e suas densidades e números atômicos efetivos.

Tabela 27 – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 60kV.

<b>Densidade x Tom de cinza</b>			<b>Número Atômico Efetivo x Tom de cinza</b>		
<b>Equação</b>	$d = -0,19 + 0,05TC$		$Z_{ef} = 2,30 + 0,21TC$		
d= densidade da amostra $Z_{ef}$ = Número Atômico Efetivo TC= Tom de Cinza					

### A.3 TENSÃO DE 70 kV

A tabela 28 mostra os resultados dos tons médios de cinza obtidos para as amostras na energia de 70 kV. A partir desses resultados, gráficos relacionando esses tons médios às densidades (figura 69) e aos números atômicos efetivos foram plotados (figura 71). Já a figura 70 e 72 mostram os ajustes lineares obtidos nessas análises, respectivamente, tom de cinza e densidade e tom de cinza e número atômico efetivo.

Tabela 28 – Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (70 kV).

<b>Amostras</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Erro</b>	<b>Número Atômico Efetivo</b>	<b>Tom de Cinza</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Ardósia</b>	2,46	0,26	10,9	43	7
<b>Alumínio</b>	2,52	0,27	13,0	45	5
<b>Mármore Branco</b>	2,85	0,32	13,1	47	7
<b>Fluorita</b>	2,88	0,25	16,6	71	10
<b>Hematita</b>	4,95	0,77	22,9	104	25
<b>Galena</b>	6,84	0,55	77,3	120	21

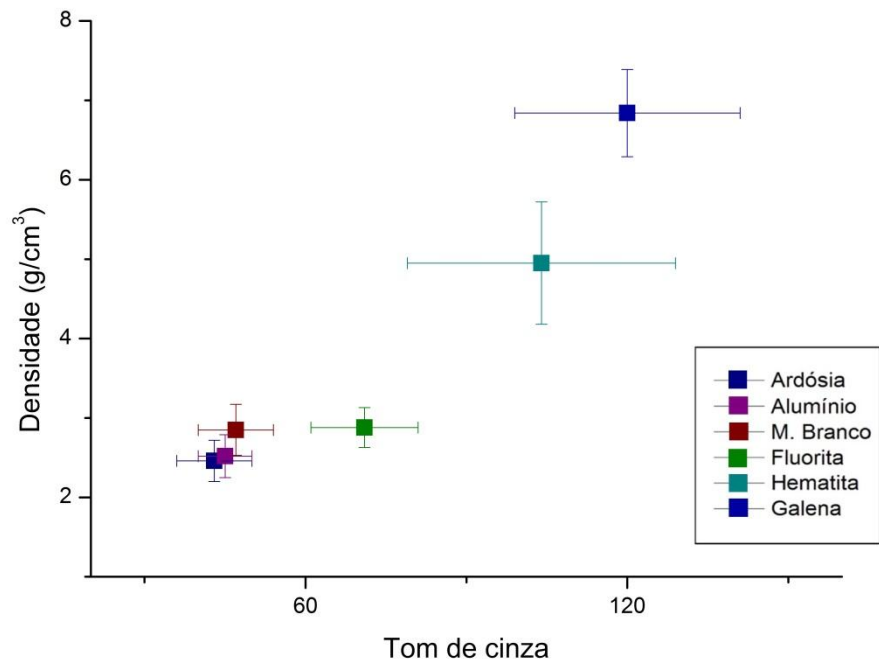


Figura 69 – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 70 kV.

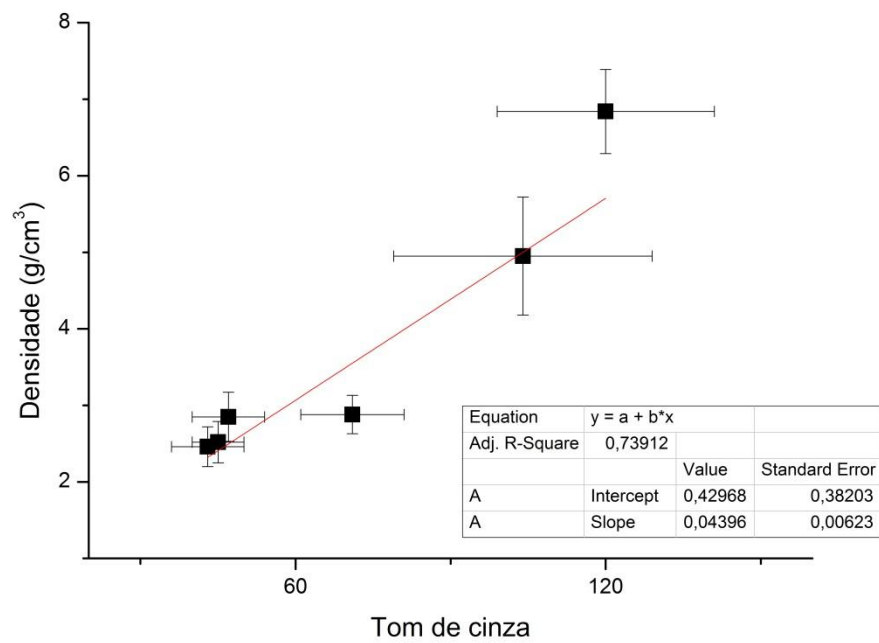


Figura 70 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 70 kV.

O ajuste linear para a densidade obteve um coeficiente de determinação de 73,91%, o que mostra não ser um ajuste que descreva bem o comportamento linear dos pontos.

Já o ajuste linear do gráfico que relaciona o tom médio de cinza com os números atômicos efetivos obteve um coeficiente de determinação de 97,17 %, mostrando que a equação linear descreve bem os pontos do gráfico.

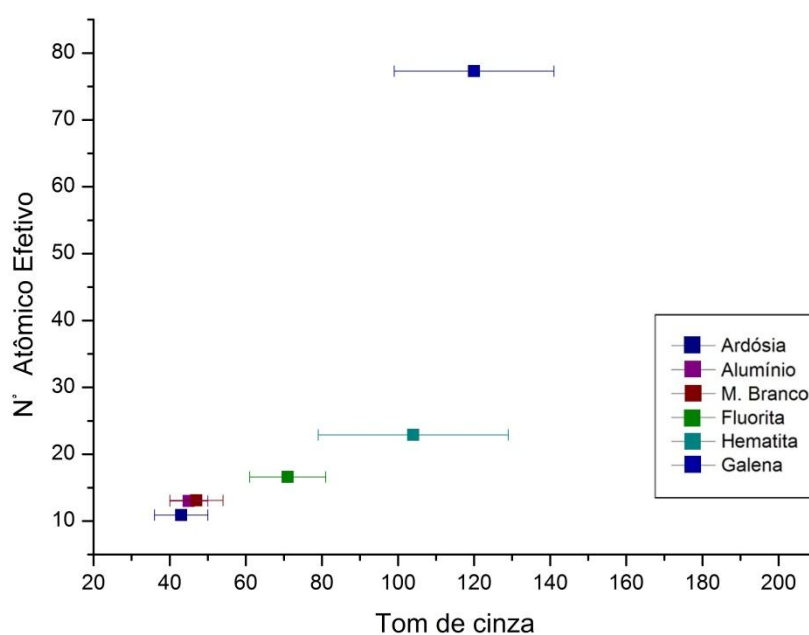


Figura 71 – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 70 kV.

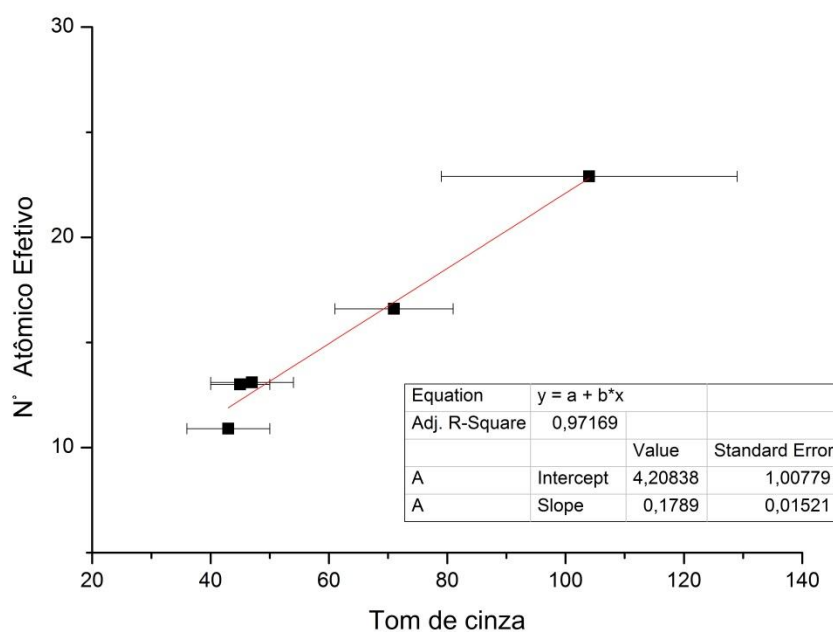


Figura 72 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 70 kV.

A tabela 29 mostra as equações obtidas pelos ajustes lineares para a energia de 70 kV.

Tabela 29 – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 70kV.

<b>Densidade x Tom de cinza</b>		<b>Número Atômico Efetivo x Tom de cinza</b>	
<b>Equação</b>	$d = 0,43 + 0,04TC$		$Z_{ef} = 4,20 + 0,18TC$
d= densidade da amostra $Z_{ef}$ = Número Atômico Efetivo TC= Tom de Cinza			

#### A.4 TENSÃO DE 80 kV

Os valores das médias dos tons de cinza calculados para essa energia, juntamente com os valores das densidades e números atômicos efetivos das amostras, são dados na tabela 30.

Tabela 30 – Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (80 kV).

<i>Amostras</i>	<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Erro</i>	<i>Número Atômico Efetivo</i>	<i>Tom de Cinza</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<b>Ardósia</b>	2,46	0,26	10,9	40	8
<b>Alumínio</b>	2,52	0,27	13,0	43	7
<b>Mármore Branco</b>	2,85	0,32	13,1	49	9
<b>Fluorita</b>	2,88	0,25	16,6	64	14
<b>Hematita</b>	4,95	0,77	22,9	105	30
<b>Galena</b>	6,84	0,55	77,3	146	27

A figura 73 mostra o gráfico que relaciona o tom de cinza médio das amostras em relação às suas densidades. O gráfico mostra que à medida que a densidade aumenta, o tom médio de cinza característico da amostra também aumenta. O ajuste linear desses dados está mostrado na figura 74. O valor de  $R^2$  nesse caso ficou em 93%, mostrando que a reta descreve relativamente bem a distribuição dos pontos.

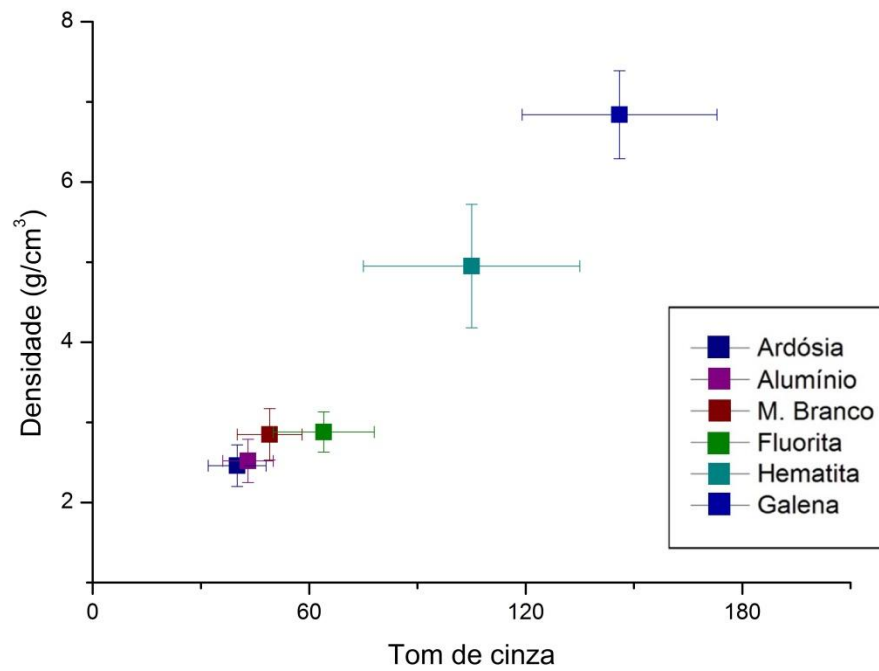


Figura 73 – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 80 kV.

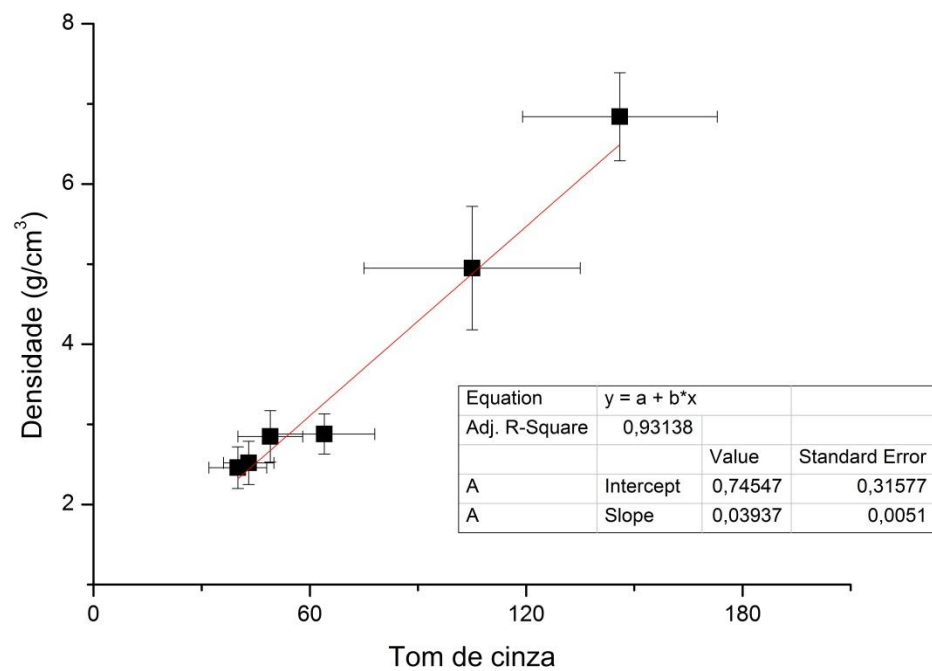


Figura 74 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 80 kV.

A figura 75 mostra o gráfico dos tons de cinza médios das amostras em relação aos seus números atômicos para a energia de 80 kV.

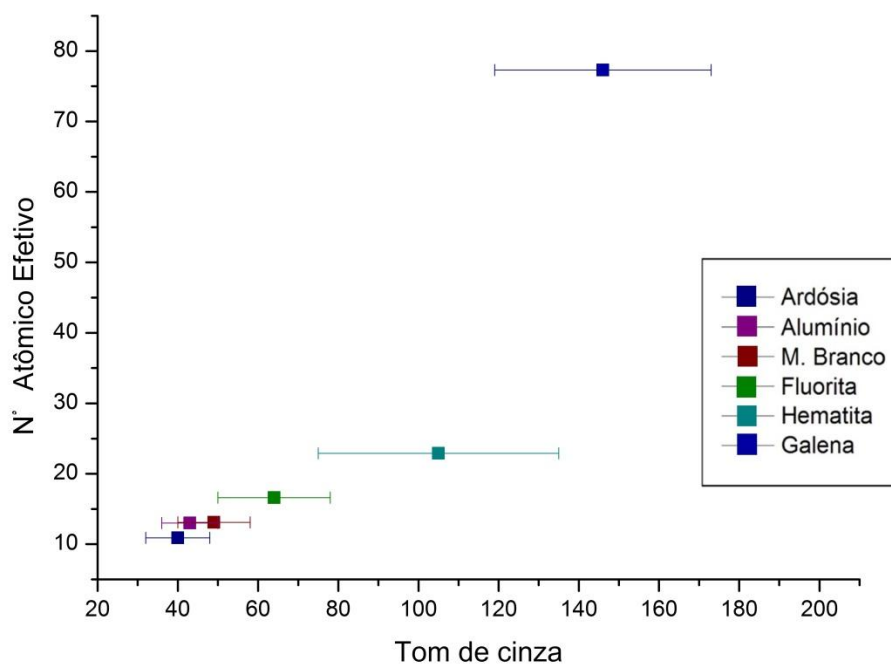


Figura 75 – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 80 kV.

Pelo gráfico da figura 75, observa-se que para números atômicos abaixo de 30, pode-se fazer um ajuste linear dos dados. Esse ajuste é mostrado na figura 76, com um  $R^2$  de 97,3%, indicando que o ajuste dos dados é bem descrito.

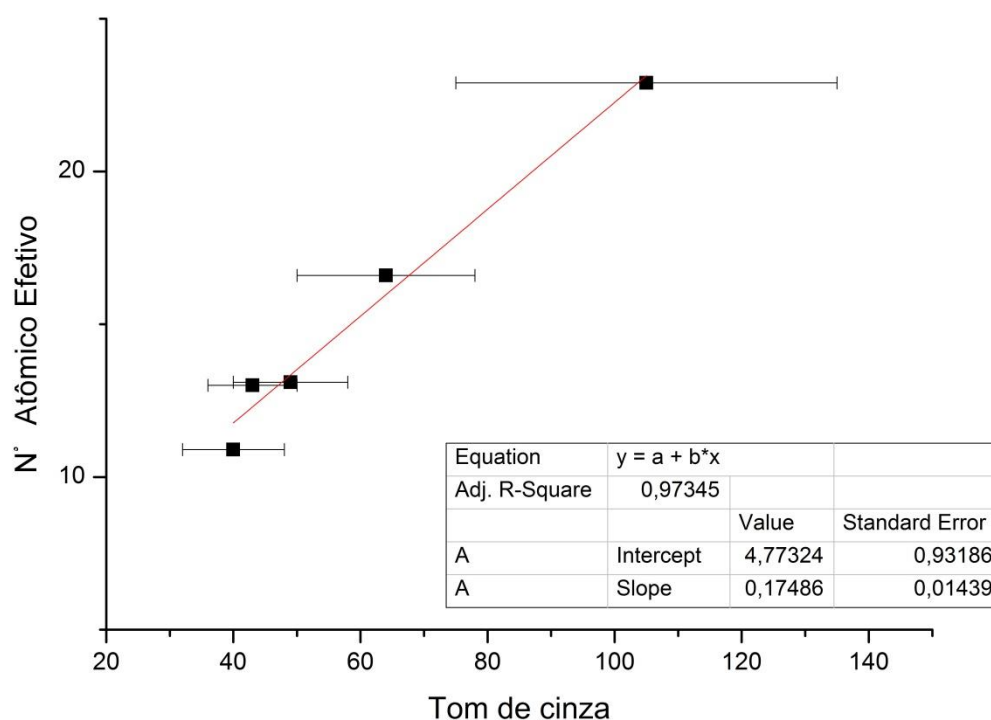


Figura 76 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 80 kV.

A tabela 31 mostra as equações de ajustes calculadas nas análises dos tons de cinza *versus* a densidade e *versus* o número atômico efetivo das amostras para a tensão de 80 kV.

Tabela 31 – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 80kV.

	<b>Densidade x Tom de cinza</b>	<b>Número Atômico Efetivo x Tom de cinza</b>
<b>Equação</b>	$d = 0,74 + 0,04TC$	$Z_{ef} = 4,77 + 0,17TC$
	d= densidade da amostra $Z_{ef}$ = Número Atômico Efetivo TC= Tom de Cinza	

## A.5 TENSÃO DE 90 kV

A tabela 32 mostra os dados obtidos para a energia de 90 kV. Já a figura 77 mostra o gráfico que relaciona o tom médio de cinza obtido para cada amostra em relação às densidades. A figura 78 mostra o ajuste linear dessa situação. Já nas figuras 79 e 80 estão sendo mostrados os gráficos relacionando o tom médio de cinza das amostras e seus respectivos números atômicos efetivos e o ajuste linear obtido nesse gráfico, respectivamente.

Tabela 32 – Médias dos tons de cinza para cada amostra, densidade e números atômicos efetivos (90 kV).

<b>Amostras</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Erro</b>	<b>Número Atômico Efetivo</b>	<b>Tom de Cinza</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Ardósia</b>	2,46	0,26	10,9	43	7
<b>Alumínio</b>	2,52	0,27	13,0	46	5
<b>Mármore Branco</b>	2,85	0,32	13,1	48	7
<b>Fluorita</b>	2,88	0,25	16,6	71	10
<b>Hematita</b>	4,95	0,77	22,9	108	32
<b>Galena</b>	6,84	0,55	77,3	160	28

Para o ajuste linear obtido para a densidade, obteve-se um coeficiente de determinação de 89,68 %, mostrando ser um ajuste linear razoável. Já para o número atômico efetivo, o coeficiente de determinação da reta foi de 97,80 %, sendo um bom ajuste.

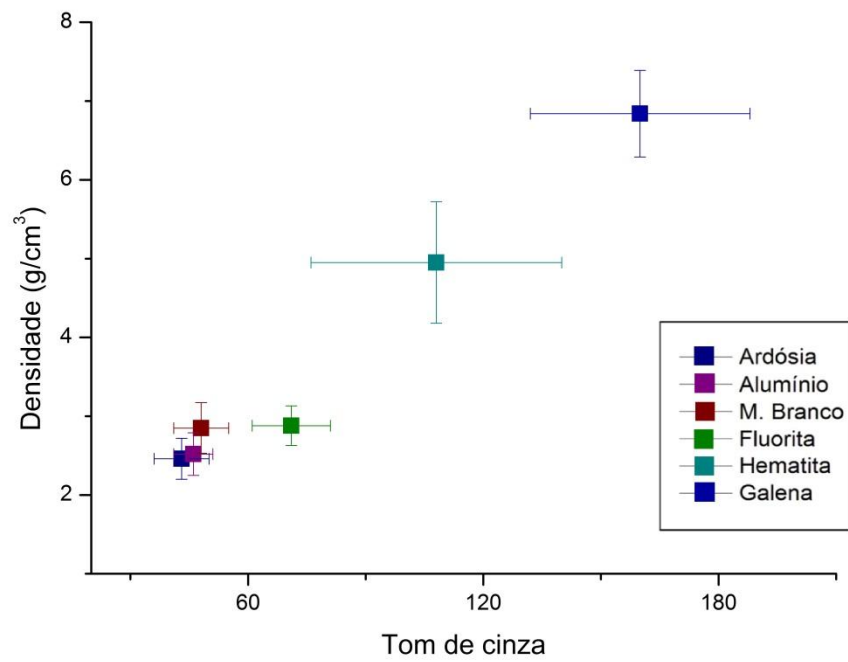


Figura 77 – Tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 90 kV

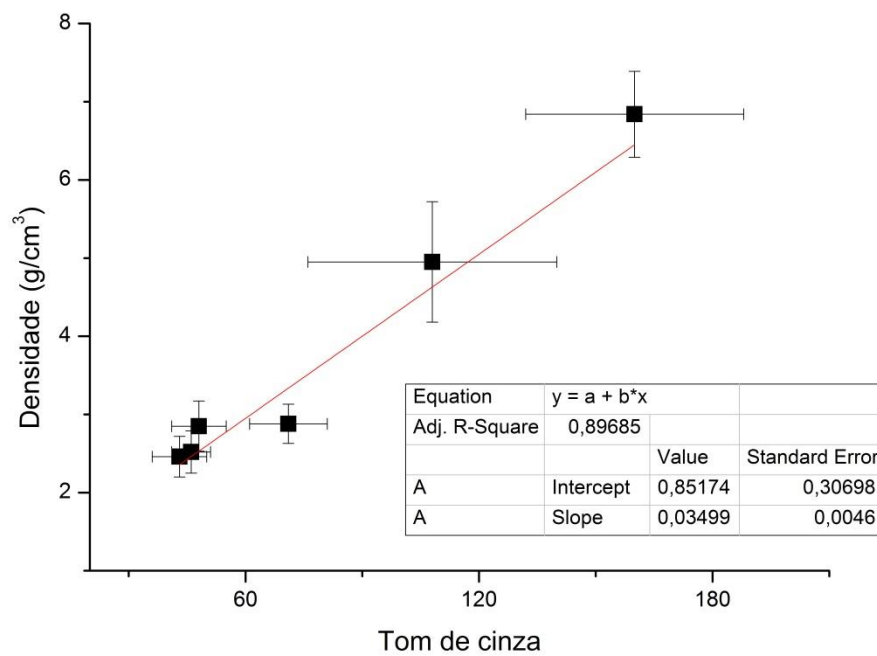


Figura 78 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus suas densidades para 90 kV.

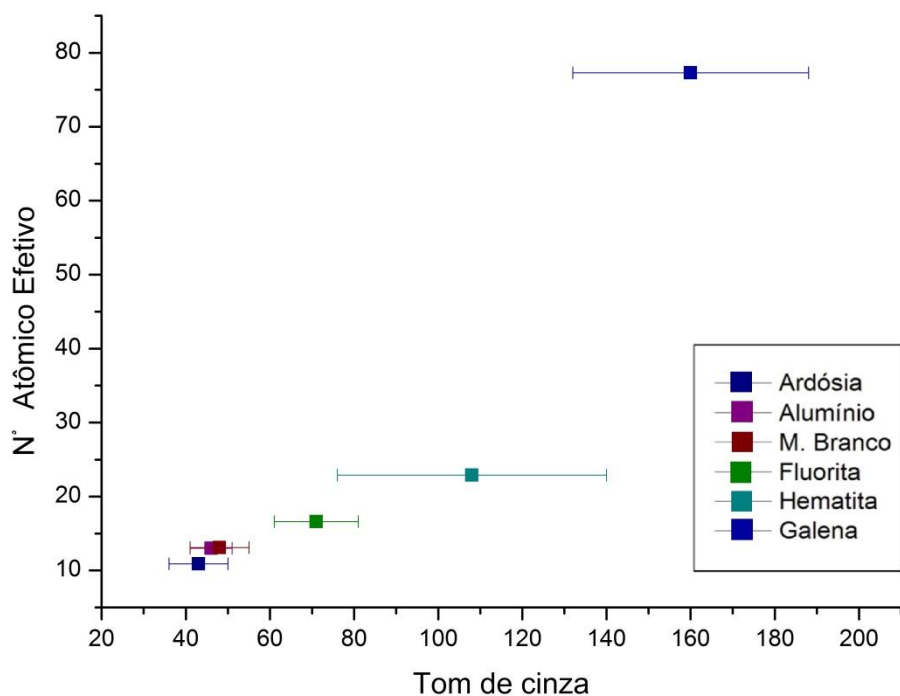


Figura 79 – Tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 90 kV.

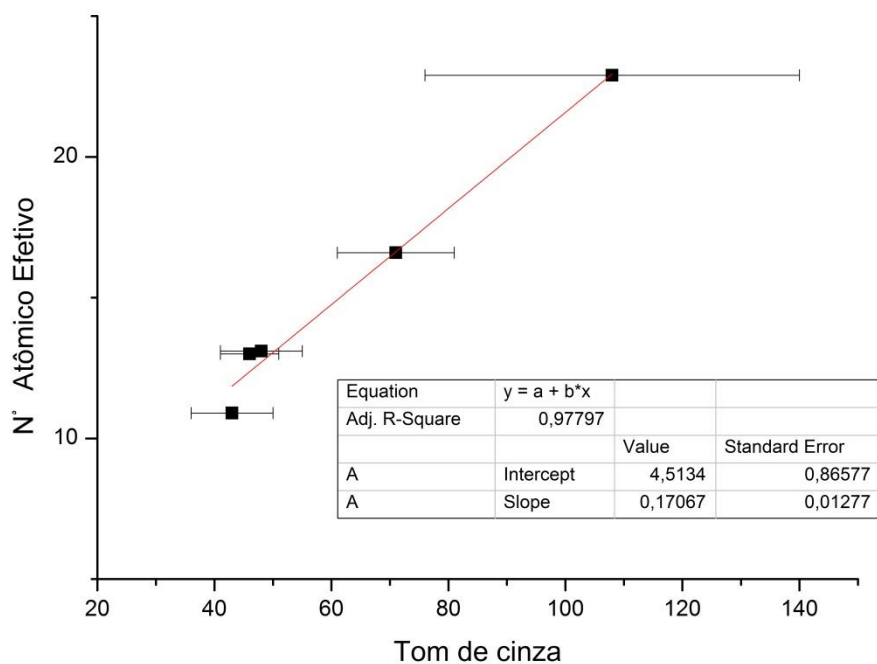


Figura 80 – Ajuste linear dos dados de tons de cinza calculados para as amostras versus seus números atômicos efetivos para 90 kV.

A tabela 33 mostra as equações obtidas nos ajustes lineares feitos pra a energia de 90 kV.

Tabela 33 – Equações de ajustes lineares para a densidade e número atômico efetivo para 90kV.

<b><i>Densidade x Tom de cinza</i></b>		<b><i>Número Atômico Efetivo x Tom de cinza</i></b>	
<b>Equação</b>	$d = 0,85 + 0,03TC$		$Z_{ef} = 4,51 + 0,17TC$
d= densidade da amostra $Z_{ef}$ = Número Atômico Efetivo TC= Tom de Cinza			