

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**LUIZ FERNANDO KASPRISIN**

**EFICIÊNCIA DE PLACAS DE ARGAMASSA DE CIMENTO COM  
ADIÇÃO DE LIMALHA DE FERRO FUNDIDO NA ATENUAÇÃO DE  
RAIOS X**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2021**

**LUIZ FERNANDO KASPRISIN**

**EFICIÊNCIA DE PLACAS DE ARGAMASSA DE CIMENTO COM  
ADIÇÃO DE LIMALHA DE FERRO FUNDIDO NA ATENUAÇÃO DE  
RAIOS X**

**Efficiency of cement mortar slabs with the addition of cast iron filings in X-ray  
attenuation**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Engenharia Civil” – Área de Concentração: Gestão e Sustentabilidade da Construção.

Orientadora: Profa. Dra. Janine Nicolosi Corrêa  
Coorientador: Prof. Dr. Walmor Cardoso Godoi

**CURITIBA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba**



LUIZ FERNANDO KASPRISIN

**EFICIÊNCIA DE PLACAS DE ARGAMASSA DE CIMENTO COM ADIÇÃO DE LIMALHA DE FERRO  
FUNDIDO NA ATENUAÇÃO DE RAIOS X**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 14 de Julho de 2021

Prof.a Janine Nicolosi Correa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Arthur Medeiros, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Cristofer Bernardi Scremim, Doutorado - Centro Universitário Curitiba (Unicuritiba)

Prof Sergei Anatolyevich Paschuk, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 14/07/2021.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus sinceros agradecimentos:

Primeiramente a Deus pela vida e oportunidade de realizar esta pesquisa, pois sem Ele não seria possível;

Aos meus pais e irmãos, pelos exemplos de vida dados, dedicação, carinho e incentivo, em todos os momentos;

À minha esposa Denize pelo intenso incentivo, paciência e apoio durante esta caminhada, e as minhas filhas Beatriz e Larissa, as quais me dão força e alegria para continuar me aperfeiçoando;

À UTFPR pela oportunidade, apoio e colaboração para o desenvolvimento da pesquisa;

Ao PPGEC, pelo curso ofertado e pelo apoio a este trabalho, pelos laboratórios e materiais disponibilizados;

À professora Janine por acreditar e apoiar esta proposta de pesquisa, bem como pela orientação, amizade, confiança e paciência durante todo o processo e desenvolvimento do trabalho;

Ao professor Walmor pelo acolhimento, apoio e orientação em etapas fundamentais na pesquisa;

À amiga Catarina Torres pela indicação, persistência e incentivo ao ingresso no programa de mestrado;

Aos amigos Felipe Perretto e Camila Nogueira pelo auxílio nas atividades em laboratórios;

Ao pesquisador Vitoldo Swinka Filho do LACTEC pela colaboração de ensaios laboratoriais e coleta de dados;

E a todos que de alguma forma, colaboraram e tornaram a realização deste trabalho possível.

A todos, muito obrigado.

*"Uma pessoa que nunca cometeu um erro, nunca tentou nada de novo"*

*Albert Einstein*

## RESUMO

KASPRISIN, L. F. **Eficiência de placas de argamassa de cimento com adição de limalha de ferro fundido na atenuação de raios X.** 2021. 95 p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

A blindagem é um fator básico para proteção radiológica, e a mesma deve ser construída de materiais que propiciem a atenuação necessária a radiação. O dimensionamento e a escolha do material dependem do tipo de radiação. Materiais como o chumbo, argamassa baritada e o concreto são comumente utilizados como barreiras de proteção a radiação. Vários fatores influenciam na eficiência, inclusive a espessura necessária. Esta pesquisa tem como objetivo analisar a eficiência de placas de argamassa de cimento com adição de limalha de ferro fundido na atenuação de raios X e assim visa analisar a efetividade de um material com adição de um resíduo originado da produção industrial. A pesquisa foi desenvolvida entre os anos de 2019 e 2021, nos Laboratórios de Materiais (DACOC) da UTFPR, campus Curitiba e do Instituto LACTEC, Paraná. A limalha de ferro fundido foi recolhida em empresa onde o processo industrial está padronizado, propiciando um resíduo que ao ser estudado, os resultados poderão ser extrapolados. A pesquisa tem foco em barreiras radiológicas preparadas com argamassa de cimento e adições. A análise da eficiência de placas de argamassa de cimento com adição de limalha de ferro fundido na atenuação de raios X mostrou que a limalha de ferro, em substituição da areia nas placas cimentícias, tem coeficiente de atenuação próximos ao do concreto, para energias mais baixas, entre 70 e 90 keV. Em energias superiores a 125 keV, a limalha de ferro apresentou resultados superiores aos outros materiais (concreto e argamassa baritada). Portanto, a limalha de ferro se mostrou eficiente, principalmente quando submetida a ensaios em maiores energias.

**Palavras chaves:** Blindagem. Proteção radiológica. Raios X. Limalha de ferro fundido. Coeficiente de atenuação.

## ABSTRACT

KASPRISIN, L. F. **Efficiency of cement mortar slabs with the addition of cast iron filings in X-ray attenuation.** 2021. 95 p. Dissertation - Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Technology - Paraná. Curitiba, 2021.

Shielding is a basic factor for radiological protection, and it must be constructed of materials that provide the necessary attenuation to radiation. The sizing and choice of material depend on the type of radiation. Materials such as lead, barium mortar and concrete are commonly used as radiation protection barriers. Several factors influence the efficiency, including the required thickness. This research aims to analyze the efficiency of cement mortar slabs with the addition of cast iron filings in the attenuation of X-rays and thus aims to analyze the effectiveness of a material with the addition of a residue from industrial production. The research was carried out between 2019 and 2021, at the Materials Laboratories (DACOC) of UTFPR, campus Curitiba and Instituto LACTEC, Paraná. The cast iron filings were collected from a company where the industrial process is standardized, providing a residue that, when studied, the results can be extrapolated. The research focuses on radiological barriers prepared with cement mortar and additions. The analysis of the efficiency of cement mortar slabs with the addition of cast iron filings in the attenuation of X-rays showed that iron filings, replacing sand in cementitious slabs, have an attenuation coefficient close to that of concrete, for lower energies, between 70 and 90 keV. At energies above 125 keV, iron filings showed superior results to other materials (concrete and barium mortar). Therefore, the iron filings proved to be efficient, especially when subjected to tests at higher energies.

**Keywords:** Shielding. Radiological protection. X-rays. Cast iron filings. Attenuation coefficient.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barreira primária e secundária de proteção radiológica.....	27
Figura 2 - Barreira de proteção radiológica com argamassa baritada.....	34
Figura 3 - Barreira de proteção radiológica com chumbo.....	35
Figura 4 - Barreira de proteção radiológica com concreto.....	38
Figura 5 - Imagens do processo de usinagem das peças e origem das limalhas de ferro fundido.....	41
Figura 6 - Bastidor de madeira para confecção do molde.....	44
Figura 7 - Materiais utilizados para a produção das placas, da maneira com que se apresentam comercialmente.....	46
Figura 8 - Desenho esquemático das placas para incidência de raios X.....	47
Figura 9 - Imagens das etapas de preparo do molde de borracha.....	48
Figura 10 - Peça de madeira para acoplamento.....	49
Figura 11 - Ensaio de compressão em corpos de prova em laboratório.....	51
Figura 12 - Processos de moldagem das placas e corpos de prova.....	53
Figura 13 - Amostras produzidas em molde e amostra de chumbo.....	54
Figura 14 - Limalhas de ferro.....	55
Figura 15 - Disposição dos equipamentos e amostras para o ensaio.....	56
Figura 16 - Imagens obtidas no ensaio de atenuação e apresenta tons de cinza.....	57
Figura 17 - Amostra parcial dos cálculos.....	58
Figura 18 - Resistência média à compressão para cada composição.....	65
Figura 19 - Atenuação em função da espessura do concreto (70 keV).....	66
Figura 20 - Atenuação nos pontos iniciais para argamassa comum (125 keV).....	67
Figura 21 - Atenuação nos pontos iniciais para argamassa baritada (125 keV).....	68
Figura 22 - Atenuação nos pontos iniciais para argamassa baritada (160 keV).....	68



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Camada semi-redutoras (HVL) e deci-redutoras (TVL).....	28
Tabela 2 - Valores do Coeficiente de Atenuação Linear " $\mu$ " .....	30
Tabela 3 - Placas intituladas de acordo com suas características e respectivos traços .....	52
Tabela 4 - Distribuição granulométrica da areia em peneiras .....	59
Tabela 5 - Distribuição granulométrica do pedrisco em peneiras.....	60
Tabela 6 - Distribuição granulométrica da limalha de ferro fundido.....	61
Tabela 7 - Distribuição granulométrica da barita .....	61
Tabela 8 - Distribuição granulométrica do cimento Portland .....	62
Tabela 9 - Massa específica dos materiais .....	63
Tabela 10 - Placas intituladas de acordo com os traços e características gerais.....	64
Tabela 11 – Valores de coeficiente de atenuação linear dos materiais.....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIEA	- Agência Internacional de Energia Atômica
ANVISA	- Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
CNEN	- Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
DACOC	- Departamento Acadêmico de Construção Civil
EC	- Comissão das Comunidades Europeias
ICRP	- <i>International Commission on Radiation Protection</i>
ICRU	- Comissão Internacional de Unidades e Medidas das Radiações
IEC	- Comissão Internacional de Eletrotécnica
ILO	- Organização Mundial do Trabalho
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento Lactec
LFNA	- Laboratório de Física Nuclear Aplicada
keV	- mil elétrons-volt
MeV	- um milhão de elétrons-volt
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
MTE	- Ministério do Trabalho e Emprego
NBR	- Norma Técnica Brasileira
NBR NM	- Norma Técnica Brasileira/Norma Mercosul
NCRP	- <i>National Council on Radiation Protection and Measurements</i>
NR	- Norma Regulamentadora
OECD/NEA	- Agência de Energia Nuclear da Organização para Cooperação e Desenvolvimento
UNEP	- Programa Ambiental das Nações Unidas Econômica e Desenvolvimento
UNSCEAR	- Comitê Científico sobre os Efeitos da Radiação Atômica da Organização das Nações Unidas
UTFPR	- Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WHO	- Organização Mundial da Saúde (OMS)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	16
1.2.1 Objetivo Geral .....	16
1.2.2 Objetivos Específicos .....	16
1.3 JUSTIFICATIVA .....	17
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....	18
1.5 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA .....	18
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
2.1 RAIOS X .....	20
2.1.1 Legislação .....	23
2.1.2 Blindagem .....	26
2.1.3 Atenuação .....	28
2.1.4 Materiais para Proteção Radiológica .....	30
2.1.4.1 Placas cimentícias .....	32
2.1.4.2 Argamassa baritada .....	33
2.1.4.3 Chumbo .....	34
2.1.4.4 Ferro fundido .....	35
2.1.4.5 Concreto .....	36
2.1.5 Resíduos .....	38
2.1.5.1 Resíduos utilizados em placas cimentícias em geral .....	40
2.1.5.2 Resíduos utilizados em placas cimentícias utilizadas como barreira radiológica .....	40
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>43</b>
3.1 MATERIAIS .....	43

3.1.1 Materiais para a Fabricação do Molde .....	43
3.1.2 Materiais para Fabricação das Placas .....	44
3.1.2.1 Placa de argamassa comum .....	44
3.1.2.2 Placa de concreto .....	45
3.1.2.3 Placa de argamassa baritada.....	45
3.1.2.4 Placa de chumbo .....	45
3.1.2.5 Placas de argamassa com limalha de ferro .....	45
<b>3.2 MÉTODOS .....</b>	<b>47</b>
3.2.1 Definição do Protótipo de Pesquisa .....	47
3.2.2 Preparação do Molde .....	48
3.2.3 Caracterização e Ensaio Físicos e Mecânicos dos Materiais .....	49
3.2.3.1 Caracterização Granulométrica.....	50
3.2.3.2 Caracterização da Resistência à Compressão .....	51
3.2.4 Preparo das Placas .....	52
3.2.5 Testes e Ensaio de Atenuação.....	55
<b>4 ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO E ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS MATERIAIS .....	59
4.1.1 Caracterização Granulométrica.....	59
4.1.1.1 Granulometria da areia.....	59
4.1.1.2 Granulometria da brita 0 (pedrisco).....	60
4.1.1.3 Granulometria da limalha de ferro fundido .....	61
4.1.1.4 Granulometria da argamassa baritada .....	61
4.1.1.5 Granulometria do cimento Portland.....	62
4.1.2 Caracterização da Massa Específica .....	63
4.1.3 Caracterização da Resistência à Compressão .....	63
4.1.4 Caracterização da Atenuação de Raios X dos Materiais .....	65

<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>89</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>93</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No final do século XIX com o descobrimento dos raios X por William Röntgen, iniciaram-se várias pesquisas as quais contribuíram para descobertas de materiais, elementos radioativos, tipos de radiações, formas de propagação, equipamentos e maneiras de controlar a exposição dos seres humanos à estas radiações. Especificamente sobre a radiação ionizante denominada raios X, concluiu-se que são processos de transferência de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas e, ao interagir com a matéria, resultam na transferência de energia para os átomos e moléculas que estejam em sua trajetória (OURIDES, 1995).

Os raios X são radiações eletromagnéticas de alta frequência, produzidas a partir da colisão de feixes de elétrons com metais. Podem ser geradas por fontes naturais ou por dispositivos construídos pelo homem, Santos (2013) cita que as aplicações das radiações podem estar presentes nas diferentes áreas como o da saúde, industrial, agricultura e na construção civil.

Normas nacionais e internacionais estabelecem requisitos para proteção radiológica das pessoas em relação às radiações em diferentes ambientes. Um dos principais órgãos internacionais voltados à proteção radiológica, a *Internacional Commission on Radiation Protection*, (ICRP, 2007) e no Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2014a) estabelecem condições mínimas de proteção contra os riscos associados a partir de fontes radioativas, com o objetivo de reduzir ou evitar situações de exposição às radiações existentes. A Norma Regulamentadora – NR 15 (MTE, 2018) determina que o controle básico para a proteção do homem e do seu meio ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados pela radiação ionizante, deverá estar de acordo com as normas vigentes. Conforme a NR-32 (MTE, 2011), instalações radioativas devem dispor de um Plano de Proteção Radiológica – PPR, o qual auxilia nas medidas de prevenção de acidentes nas organizações.

Observa-se que trabalhos relacionados à atenuação de radiação ionizante de diferentes tipos e diferentes energias foram desenvolvidos e produziram relatórios de importância como a série *National Council on Radiation Protection and Measurements* (NCRP 49, 1976; NCRP 147, 2004), os quais têm como objetivo apoiar a proteção

contra radiação, fornecendo análises, informações e recomendações científicas independentes que representam o consenso dos principais cientistas.

O relatório NCRP 49 (1976) trata de projetos e avaliações de blindagem estrutural em instalações médicas que utilizam raios gama de energia de até 10 MeV. O relatório contém recomendações e informações técnicas quanto aos fatores que devem ser levados em consideração na seleção de materiais de blindagem com características atenuantes e no cálculo da espessura da barreira de proteção. O NCRP 49 (1976) também tem ênfase nas curvas de atenuação da radiação ionizante para chumbo, concreto, ferro, dentre outros materiais utilizados nas blindagens de instalações radiativas. Já o NCRP 147 (2004) apresenta recomendações e informações técnicas relacionadas ao projeto e instalação de blindagem estrutural para instalações que usam raios X para imagens médicas, bem como descreve critérios usados para o dimensionamento de blindagem em instalações de raios X.

A Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ, 2018) ressalta que as proteções contra as fontes de radiação devem ser implantadas de acordo com o risco existente no local. O controle das doses deve considerar três fatores: tempo de exposição, distância da fonte de radiação e blindagem. A espessura da blindagem pode variar conforme o tipo de radiação, atividade da fonte e velocidade de dose aceitáveis após a blindagem.

Ainda conforme a FIOCRUZ (2018), os elementos responsáveis pela barreira ou blindagem devem possuir características e espessura suficiente de maneira a garantir a proteção contra a radiação emitida no ambiente. Para a blindagem de raios X usa-se geralmente o chumbo. Contudo, outros materiais podem ser utilizados embora a espessura necessária para se obter a mesma atenuação que a obtida com o chumbo possa ser maior.

Segundo Costa (1999), os materiais mais utilizados para atenuação e proteção contra raios X são o chumbo e o concreto, e, para revestimento de paredes, a argamassa baritada. Desta forma, fica evidente que no quesito barreira radiológica, os materiais mais comuns utilizados são: placas de chumbo, paredes recobertas com argamassa baritada e paredes de concreto, inclusive combinações entre estes materiais. Principalmente isto se evidencia pela extensa produção bibliográfica sobre blindagens com estes materiais, como os trabalhos de Costa (1999), Almeida Junior (2005) e Douglas (1987).

Almeida Junior (2005) observa que a argamassa baritada (cimento, areia, água, sulfato de bário) vem sendo utilizada como blindagem de radiações X, comenta que este uso tem a ver com as vantagens relacionadas à eficiência de blindagem, ao manuseio e suposta facilidade de ser encontrada no mercado nacional.

Todavia, paredes recobertas com argamassa baritada para a proteção de ambientes com uso de equipamentos de raios X comuns, em geral, apresentam camadas de material superiores às de projeto pelo fato de o material possuir característica de trabalhabilidade inferior a argamassa comum. Neste sentido, há eventual desperdício do material.

A estrutura de proteção pode ser feita com placas de chumbo, porém o uso deste material costuma ter um custo maior se comparado à argamassa baritada. Uma opção para blindagens (paredes) pode ser o uso de placas cimentícias com adição de particulados de chumbo, material de alta densidade. Outra opção pode ser o uso de placas com adição de limalha de ferro fundido, relacionada à densidade do ferro, que embora menor que a do chumbo, possui propriedades atenuantes (CNEN, 2014b).

O conhecimento das características de atenuação de resíduos de ferro às radiações ionizantes é de grande importância, tanto do ponto de vista da radioproteção, quanto da viabilidade, elaboração e execução de projetos de blindagem das radiações externas nas instalações radiativas. Diante disto, serviram como estímulo desta pesquisa, o interesse sobre os efeitos de materiais alternativos como elementos de bloqueio aos raios X.

Para que este trabalho tenha relevância no âmbito da eficiência do uso efetivo de limalha de ferro fundido como agregado na produção de placas cimentícias, esse agregado, como objeto de pesquisa, deve obrigatoriamente advir de processos industriais padronizados. A observação da padronização do material e do processo serve ao propósito da possível utilização do agregado em produção de placas que pode, em determinada situação, ser parte de processo produtivo comercial.

Vale ressaltar que é intrínseco ao escopo deste trabalho o fato de que a evolução na construção civil trouxe nas últimas duas décadas inovações técnicas nos materiais e métodos construtivos, os quais possibilitaram maior eficiência na construção civil bem como no estudo e aplicação de novos materiais que contêm resíduos provenientes da indústria.



Ainda sobre aspectos correlatos, a questão ambiental incentiva o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao uso de resíduos provenientes tanto da construção civil quanto de indústrias na fabricação de novos materiais e produtos. Neville e Brooks (2013) menciona que a obtenção de agregados está sendo afetada devido às altas taxas de consumo e extração de recursos naturais. O autor ressalta ainda que, além das restrições nas etapas de extração, há problemas também com destinação e reaproveitamento de resíduos provenientes da construção e demolição, os quais poderiam ser transformados em agregados para uso em concretos e são de grande interesse, tanto por aspectos econômicos, quanto ambientais.

Desta forma, o foco deste trabalho é o desenvolvimento de um material composto basicamente de cimento com adição de limalhas de ferro fundido, para utilização como barreira de proteção radiológica. O material adicionado é proveniente da indústria de fabricação de peças de ferro fundido e esta pesquisa tem o intuito geral o aproveitamento dos resíduos atualmente descartados pela indústria, contribuindo desta maneira com o meio ambiente e na diminuição do custo de construção de barreiras radiológicas.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é analisar a eficiência de placas de argamassa de cimento com adição de limalha de ferro fundido na atenuação de raios X.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Produzir placas cimentícias atenuantes para radiação X, com a adição de limalha de ferro fundido;
- Estudar as características físicas e mecânicas de placas atenuantes com adição de limalhas de ferro fundido;
- Analisar a eficiência ao bloqueio de raios X de placas de concreto, cimento, argamassa baritada, chumbo e de limalha de ferro fundido;

- Determinar os coeficientes de atenuação linear das amostras;
- Comparar a eficiência de atenuação de placas cimentícias com adição de limalha de ferro junto aos materiais comumente utilizados nas estruturas de proteção radiológica.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A blindagem é um fator básico para proteção radiológica, e a mesma deve ser construída de materiais que propiciem a atenuação necessária a radiação. O dimensionamento e a escolha do material dependem do tipo de radiação e o nível de equivalência da radiação. Materiais como o chumbo, argamassa baritada e o concreto são comumente utilizados como barreiras de proteção a radiação (ALMEIDA JUNIOR, 2005).

Materiais diferentes têm atenuações diferentes, o que não faz com que, necessariamente, um possa ser considerado melhor que outro, em uma análise simples. Vários fatores influenciam na eficiência, inclusive a espessura necessária. A partir do fator de radiação, característico das radiações ionizantes e do meio, determina-se a espessura da proteção radiológica (TAMAKI, 2011).

Esta pesquisa visa analisar a efetividade de um material pouco explorado comercialmente como barreira radiológica, mais especificamente na eficiência de atenuação de raio X.

Nos últimos anos houve um aumento na aplicação de resíduos na produção de produtos principalmente para a construção civil, porém há menor ênfase em pesquisas com foco na aplicação de resíduos industriais para o aproveitamento em proteções a radiação, o que evidencia uma vertente interessante de pesquisa.

Com base nos dados extraídos de uma indústria metalúrgica situada no município de São José dos Pinhais, Estado do Paraná, nos últimos cinco anos foram geradas cerca de 140 toneladas de resíduo originadas da produção de peças industriais. Atualmente os resíduos de ferro fundido, em sua grande maioria limalhas de ferro, são destinadas a empresas responsáveis pelo recolhimento e destinação do resíduo.

Sabendo-se que existem vários locais que descartam limalha de ferro provenientes dos processos produtivos, e que o mesmo pode ser utilizado para outros

fins de produção, justifica-se esta pesquisa. Esta pesquisa fará a utilização deste resíduo no desenvolvimento de um novo material atenuante em barreiras radiológicas, contribuindo para a proteção das pessoas em locais com a emissão de radiações ionizantes.

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa foi desenvolvida entre os anos de 2019 e 2021, nos Laboratórios de Materiais (DACOC) da UTFPR, campus Curitiba e do Instituto LACTEC, Paraná.

Os materiais de construção utilizados foram adquiridos em estabelecimentos comerciais, bem como os materiais específicos (chumbo e argamassa baritada). A limalha de ferro fundido foi recolhida em empresa onde o processo industrial está padronizado.

A pesquisa tem foco na análise de materiais utilizados como atenuantes de raios X. As amostras foram preparadas com argamassa de cimento e adições de limalhas de ferro fundido, bem como materiais já utilizados para tal finalidade.

Para a verificação e análise do comportamento das amostras, foi necessária a realização do estudo dos materiais aplicados, como o ensaio de granulometria, massa específica, resistência a compressão e atenuação de raios X. Outras análises de materiais como características químicas e absorção de água das amostras não foram realizadas nesta pesquisa.

Os experimentos, as caracterizações e os testes físicos sobre os materiais foram preparados nos laboratórios do DACOC. Já os ensaios de atenuação dos raios X foram feitos no Instituto LACTEC, Paraná.

#### 1.5 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Após a descoberta dos raios X, iniciaram-se estudos e pesquisas que melhor compreendessem as ondas ou partículas que se propagavam com alta velocidade e geravam energia. Com o decorrer dos anos, as pesquisas contribuíram para a descoberta dos tipos de radiações, suas formas de propagação, maneiras de controle a exposição dos seres humanos à estas radiações, e auxiliaram na elaboração de

normas as quais estabelecem requisitos para proteção das pessoas em diferentes ambientes.

Pesquisas sobre barreiras radiológicas têm sido desenvolvidas desde a descoberta dos efeitos negativos da radiação nas pessoas expostas. Conforme Pereira *et al.* (2015), no Brasil, as primeiras leis de radioproteção apareceram em 1988 com a norma NE 3.01 da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2014a), porém mesmo com diversas atualizações na legislação o Brasil se encontra relativamente defasado em relação à radioproteção mundial.

Pesquisas auxiliam no desenvolvimento de novas tecnologias e na solução de problemas de proteção radiológica, contribuindo para a utilização segura da radiação ionizante. Alguns estudos voltados a radioproteção como o de Costa (1999) e Almeida Junior (2005), contribuem para o conhecimento de atenuação de materiais convencionais utilizados atualmente nas estruturas de bloqueio radiológico.

Quanto a utilização de materiais reciclados para a produção de novos materiais, atualmente existem comprovações de que resíduos oriundos da construção civil podem ser utilizados como agregados na produção de concretos, tijolos, cerâmicas e como base para estradas.

Esta pesquisa contém cinco capítulos. No primeiro capítulo são apresentadas as considerações iniciais sobre o tema, os objetivos e a justificativa da pesquisa proposta. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica como à definição de raios X, legislação, blindagem e atenuação de raios X e materiais para proteção radiológica. No terceiro capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados, bem como a caracterização e ensaios físicos dos materiais. No quarto capítulo, são apresentados os resultados de atenuação e caracterização dos materiais. O quinto capítulo é dedicado a conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta os conceitos básicos dos elementos de radioproteção elencados nesta pesquisa, evidencia a literatura sobre o assunto, bem como aborda de maneira sucinta a terminologia e características das matérias-primas utilizadas nas placas cimentícias.

### 2.1 RAIOS X

No final do século XIX, William Röntgen descobriu através do uso de bobinas de indução uma nova espécie de radiação produzida pela passagem de uma corrente elétrica por uma ampola de vidro, que produzia fluorescência ao incidir sobre um papel impregnado por platinocianeto de bário (ARRUDA, 1996).

A partir desta descoberta, iniciaram-se várias pesquisas em todo o mundo, através de pesquisadores, acadêmicos e amadores os quais passaram a reproduzir o experimento de Röntgen, as quais contribuíram para descobertas de materiais, elementos radioativos, tipos de radiações, formas de propagação, equipamentos e maneiras de controlar a exposição dos seres humanos à estas radiações (OURIDES, 1995).

As radiações são ondas ou partículas que se propagam com alta velocidade gerando energia, eventualmente carga elétrica e magnética, as quais podem atravessar materiais com maior ou menor intensidade, dependendo da natureza do material. Podem ser geradas por fontes naturais ou por dispositivos construídos pelo homem, como ressaltado por Santos (2013). As aplicações da radioatividade podem estar presentes nas diferentes áreas como o da saúde, industrial, agricultura e na construção civil.

Para Costa (2017) radiações ionizantes podem ser utilizadas na medicina em diagnósticos e terapias, na agricultura para o controle de pragas e metabolismo de plantas, na indústria como radiografia e inspeção de níveis, em outras aplicações como esterilização de materiais cirúrgicos e inspeção de bagagens.

Os primeiros incidentes registrados relacionados a utilização de atividades radioativas foram em 1896, sendo o primeiro óbito relacionado em 1904 (ARRUDA, 1996). Conforme Costa (1999) técnicas radioativas utilizadas nos primórdios

apresentavam tempos de exposição de até 45 minutos para obtenção de imagens, e que alguns estudiosos da época relacionavam danos nos tecidos biológicos a exposição da radiação X.

Atualmente, mesmo havendo o conhecimento dos possíveis danos à saúde do homem junto a exposição à radiação X, há consenso sobre os evidentes benefícios do uso de tecnologias relacionadas aos raios X, principalmente no uso médico. Conforme a portaria 3535 (MS, 1998), em seu ANEXO II, recomenda a implantação de um aparelho de radioterapia para cada 500 novos casos da doença.

Quanto a área industrial, houve nos últimos anos uma crescente utilização de atividades envolvendo radiações ionizantes, como o tratamento de gases industriais, águas residuais, lodos, esgotos, realização de ensaios não destrutivos no interior de materiais, modificação de materiais poliméricos, preservação e desinfestação de produtos alimentícios e esterilização de materiais da área da saúde (PINO e GIOVEDI, 2005).

No contexto do uso benéfico das radiações ionizantes, há a necessidade de medidas que assegurem a saúde humana. Desta maneira, a proteção radiológica surge como um conjunto de medidas destinadas a evitar prejuízos à saúde do homem e o equilíbrio ambiental, de forma a protegê-los de possíveis causas originadas pela radiação ionizante (TAUHATA, *et al.* 2013).

Os princípios básicos para o sistema de proteção radiológica segundo a Resolução da Diretoria Colegiada - RDC Nº 330 (Ministério da Saúde, 2019), regulamenta que os ambientes onde se realizam procedimentos radiológicos diagnósticos ou intervencionistas devem possuir barreiras físicas com blindagem suficiente para garantir a manutenção de níveis de dose tão baixos quanto razoavelmente exequíveis, não ultrapassando os níveis de restrição de dose estabelecidos.

Para Cember (1996, *apud* ALMEIDA JUNIOR, 2005) a prática da proteção radiológica é fundamental no controle dos perigos para a saúde do homem e do seu ambiente contra possíveis efeitos da radiação ionizante.

Para uma melhor eficiência no controle a exposição de pessoas a essas fontes de radiação deve haver a aplicação de uma ou mais das seguintes técnicas: limitação do tempo de exposição; à maximização da distância da fonte de radiação; e blindagem da fonte de radiação. A redução do nível de radiação ionizante, em um ambiente pode

ser alcançada através da blindagem dessa fonte, entretanto, a eficiência da blindagem da instalação depende, dentre outros fatores, do material a ser utilizado e do tipo de radiação emitida pela fonte (CEMBER, 1996, *apud* ALMEIDA JUNIOR, 2005).

Conforme Almeida (2018) para que as instalações atendam as normas vigentes de proteção radiológica, as mesmas devem possuir dimensões mínimas recomendadas para a proteção dos usuários expostos, de forma que estes não fiquem expostos a valores de dose estabelecidas nas normas. As barreiras de proteção radiológica são uma alternativa de se reduzir a exposição aos raios X.

De acordo com Archer (1993) *apud* Costa (1999), os conceitos utilizados atualmente relacionados a proteção radiológica, dividem-se em cinco períodos. O primeiro período caracterizou-se pelos estudos dos danos iniciais causados pelos raios X e pela crescente conscientização de que métodos de proteção seriam necessários.

Um segundo período foi marcado pela tentativa de produção de guias relacionados a orientações para radioproteção, indicando a utilização de chumbo para proteção.

No terceiro período, ocorrido entre os anos de 1922 e 1928, houve a publicação das primeiras recomendações de radioproteção para trabalhadores da área radiológica, indicando espessuras de chumbo para proteção do ambiente e do trabalhador. Nesta época surgiram as primeiras tentativas de quantificação de espessuras de barreiras necessárias para a proteção adequada de operadores e público (COSTA, 1999).

O quarto período foi marcado pela fundação da *Internacional Commission on Radiation Protection* - ICRP em 1928, a partir de então esta comissão passou a definir diretrizes de radioproteção e recomendações do uso seguro da radiação ionizante utilizadas atualmente por vários países no mundo. Em 1969 foi criada o NCRP – *National Council on Radiation Protection and Measurements*, o qual passou a publicar relatórios com recomendações de proteção em salas radiológicas, materiais, distancias, proteção de cabines, entre outras características de proteção do ambiente (NCRP, 1976).

O quinto e último período, descrito por Archer (1995) como a Era Moderna, caracterizou-se pela sofisticação nas técnicas de radioproteção, cargas de trabalho e pela apresentação de resultados de medições de radiação primária e curvas de

atenuação para o chumbo. Neste período também foram recomendadas as primeiras regras referentes a qualificação de profissionais para a execução de projetos de blindagem.

### 2.1.1 Legislação

Normas nacionais e internacionais estabelecem requisitos para proteção radiológica das pessoas em relação às radiações em diferentes ambientes. Com o desenvolvimento e aumento da utilização da radiologia em todo o mundo, houve a necessidade da elaboração de diretrizes que recomendassem medidas de proteção contra a radiação.

Os raios X, como também as radiações provenientes de elementos radioativos, representam elevado potencial de danos às pessoas, sendo desta maneira motivo necessário para que sejam seguidas rigorosamente as regulamentações existentes no país, ou, na ausência destas, outras normas reconhecidas (ICRP, 2007).

A aplicação de diretrizes relacionadas a radioproteção, tem como objetivo regulamentar a utilização de fontes de radiação. Para tanto é necessário que autoridades competentes de cada país estabeleçam regras e medidas de proteção para as práticas, instalações, fontes e equipamentos de radiação, como também para profissionais, indivíduos do público e meio ambiente em função do grau de risco associado (ALMEIDA JUNIOR, 2005).

Criada em 1928, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) é uma organização sem fins lucrativos cujo principal objetivo é a sistematização de recomendações de radioproteção. Através de parcerias com a Comissão Internacional de Unidades e Medidas das Radiações (ICRU) e o Comitê Científico sobre os Efeitos da Radiação Atômica da Organização das Nações Unidas (UNSCEAR), a ICRP publica suas recomendações. A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), então, organiza as recomendações feitas pela ICRP como normas e guias (PEREIRA, *et al.*, 2015).

O relatório elaborado pela ICRP na década de 70 (publicação N°26, 1977) quantifica pela primeira vez o risco dos efeitos das radiações no ambiente e propõe um sistema de limitação de dose, porém com a evolução da radiação e novos



conhecimentos sobre radioproteção, forçaram no decorrer dos anos a ICRP a mudar conceitos e recomendações (PEREIRA, *et al.*, 2015).

A *Internacional Commission on Radiation Protection* (ICRP, 2007) e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2014a), estabelecem condições mínimas de proteção contra os riscos associados a partir de fontes radioativas, objetivando reduzir ou evitar situações de exposição as radiações existentes.

A CNEN não executa atividades regulatórias nas instalações de radiodiagnóstico, mas sim promove através de normas e resoluções ações de proteção radiológica. A norma CNEN-NE-3.01 (CNEN, 2014a), estabelece diretrizes básicas de radioproteção, exigindo padrões mínimos quanto ao conjunto de medidas de proteção ao ser humano, responsabilidades de implantação e instalação de sistemas de segurança das fontes, bem como o monitoramento e aplicação de doses mínimas de radiações emitidas no ambiente. As doses são a quantidade de energia radioativa absorvidas por um órgão, tecido e partes do corpo humano, as taxas ou limites estabelecidos em normas são anuais e variam do tipo de indivíduo exposto, podendo ser o ocupacional ou o público, onde de maneira geral estes limites poderão variar entre 1 mSv a 500 mSv entre dose efetiva e dose equivalente.

O *National Council on Radiation Protection and Measurements* em duas edições nº49 (NCRP, 1976); nº147 (NCRP, 2004), fornece análises, informações e recomendações científicas independentes que representam o consenso dos principais cientistas. O relatório nº49 (NCRP, 1976) trata de projetos e avaliações de blindagem estrutural em instalações médicas que utilizam raios gama de energia de até 10 MeV. O relatório contém recomendações e informações técnicas quanto aos fatores que devem ser levados em consideração na seleção de materiais de blindagem adequados e no cálculo da espessura da barreira. O NCRP nº49 (NCRP, 1976) deu ênfase nas curvas de atenuação da radiação ionizante para chumbo, concreto, ferro, dentre outros materiais utilizados nas blindagens de instalações radiativas. O NCRP nº147 (NCRP, 2004), apresenta recomendações e informações técnicas relacionadas ao projeto e instalação de blindagem estrutural para instalações que usam raios X para imagens médicas. O objetivo da blindagem é limitar a exposição à radiação para funcionários e público, descreve critérios usados para o cálculo de blindagem em instalações de raios X.

A Resolução da Diretoria Colegiada - RDC Nº 330 (Ministério da Saúde, 2019), regulamenta que os ambientes onde se realizam procedimentos radiológicos diagnósticos ou intervencionistas devem possuir barreiras físicas com blindagem suficiente para garantir a manutenção de níveis de dose tão baixos quanto razoavelmente exequíveis, não ultrapassando os níveis de restrição de dose estabelecidos. Além das características de proteção radiológica regulamentadas, deve haver um projeto onde conste o *layout* das áreas de serviço, ambientes próximos e os equipamentos utilizados.

A Norma Regulamentadora – NR 15 (MTE, 2018), determina que o controle básico para a proteção do homem e do seu meio ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados pela radiação ionizante, deverão estar de acordo com as normas vigentes. Recomenda que nas atividades onde haja exposição de radiação ionizante junto aos trabalhadores, deve haver controles básicos para a proteção do homem e do seu meio ambiente, conforme exigências constantes da Norma CNEN-NE-3.01 (CNEN, 2014a).

A norma NR-32 (MTE, 2011), estabelece diretrizes básicas para a implantação de medidas de proteção à segurança e à saúde em locais com emissão de radiações ionizantes, recomenda que as mesmas devem dispor de um Plano de Proteção Radiológica – PPR, o qual auxilia na prevenção de acidentes nas organizações. A norma descreve radioproteção como sendo o conjunto de medidas que visa proteger o ser humano, seus descendentes e o meio ambiente de possíveis efeitos indesejados causados pela radiação ionizante.

Conforme Metha e Monteiro (2008), normas de especificação para agregados para concreto de proteção contra radiação, auxiliam no detalhamento de materiais relativos para a produção de concretos de blindagem biológicas. A primeira refere-se à especificação para agregados de concreto destinados a blindagem contra radiação e a segunda determina a nomenclatura dos componentes dos agregados de concreto para concretos destinados a blindagem contra radiação.

Outras organizações ao redor do mundo como a Organização Mundial da Saúde (WHO), a Organização Mundial do Trabalho (ILO), o Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP), a Comissão das Comunidades Europeias (Comissão Europeia, EC), a Agência de Energia Nuclear da Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD/NEA), a Organização Internacional para

Padronização (ISO) e a Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) também participam com recomendações regionais e na preparação das normas e guias (ICRP, 2007).

No Brasil, as primeiras normativas de radioproteção foram implantadas em 1988 com a já citada norma NE 3.01 da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 1988). Este documento foi elaborado a partir das recomendações da ICRP-26 e posteriormente revisada conforme a ICRP-60. Porém, quando comparado ao desenvolvimento e implantação de normas e leis de radioproteção, o Brasil se encontra relativamente defasado em relação aos demais países do mundo (PEREIRA, *et al.*, 2015).

### 2.1.2 Blindagem

Atualmente existe em vigência uma legislação formada por normas, leis e regulamentações tanto nacionais quanto internacionais, que recomendam e exigem que os ambientes destinados a atividades radiológicas devem dispor de projeto específico indicando as áreas de risco, bem como um memorial de blindagem.

Conforme a NR-32 (MTE, 2011), as blindagens são barreira protetoras, material ou dispositivo interposto entre uma fonte de radiação e seres humanos ou meio ambiente com o propósito de segurança e proteção radiológica (MTE, 2011).

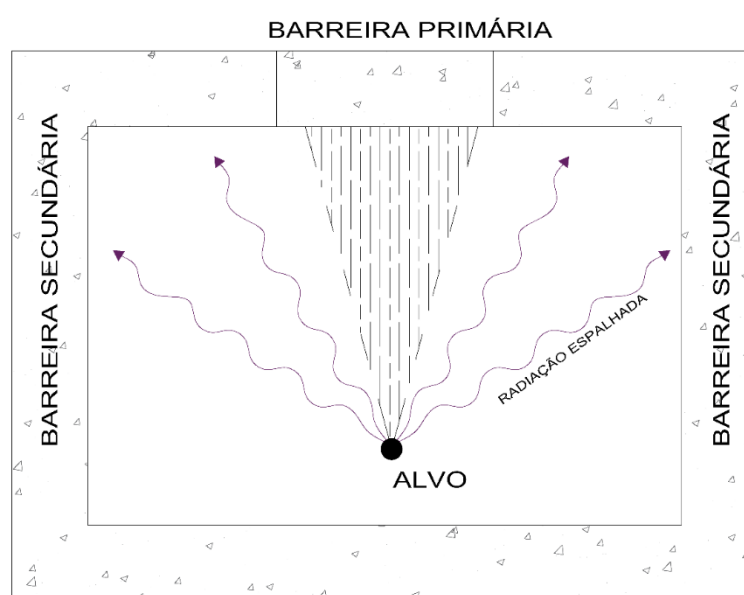
As barreiras destinadas a proteção e blindagem de raios X, tem a função de garantir segurança contra eventuais exposições desnecessárias ou acidentais. Em certas situações, principalmente quando se opera com fontes intensas ou níveis elevados de radiação, além de equipamentos de proteção individual e outros artefatos, é necessário implantar a blindagem. Além da blindagem, as radiações externas podem ser controladas a partir do tempo de exposição e distância entre a fonte e a estrutura exposta (TAUHATA *et al.*, 2013).

O dimensionamento de barreiras de proteção em instalações radiológicas, deve-se levar em consideração informações como carga de trabalho, tensão nominal de aparelhos utilizados, fator de uso (que considera a direção do feixe de radiação sobre a camada de proteção) e o fator de ocupação (relacionado ao tempo de permanência de pessoas nas diferentes áreas de proteção). Além dos fatores como carga de trabalho, tensão de operação de equipamentos e fator ocupação, outra

condição que influencia na espessura do material instalado é a arquitetura dos ambientes e distâncias das fontes às barreiras (COSTA, 1999).

Para Tauhata *et al.* (2013) ambientes como as áreas controladas devem ser limitadas fisicamente por paredes ou barreiras. Além do dimensionamento de barreiras primárias, deve-se calcular a barreira secundária devido ao espalhamento da radiação no ambiente. Na Figura 1 estão ilustrados os tipos de barreira citados acima.

**Figura 1 - Barreira primária e secundária de proteção radiológica**



**Fonte: O autor, 2021.**

A barreira primária é a parte da estrutura (paredes, piso e teto) destinado a conter diretamente o feixe primário, esta barreira é determinada através de curvas de atenuação. As barreiras secundárias são todas as partes da estrutura da sala de tratamento, que não são atingidas diretamente pelo feixe primário, mas pelos feixes espalhados e pela radiação de fuga. Essas barreiras fornecem blindagem contra ambos os feixes produzidos na sala de tratamento (TAUHATA *et al.*, 2013).

Se a barreira de proteção primária for maior ou igual à barreira de proteção secundária, considerar-se-á como barreira de proteção total a maior destas (COSTA, 1999).

Outros parâmetros de atenuação de feixes de radiação X, são as camadas semi-redutoras e deci-redutoras, que auxiliam da penetração das energias geradas.

Para Tauhata *et al.* (2013) como a intensidade de feixes de raios X e raios gama não podem ser totalmente atenuadas pela blindagem, a redução de energia da radiação, pode ser minimizada pelo tipo de material absorvedor e a sua espessura. Para tanto são utilizados parâmetros experimentais para definição de espessuras de diferentes materiais. Um dos parâmetros é denominado de camada semi-redutora (HVL = *Half Value Layer*), definido como sendo a espessura de material que atenua à metade a intensidade do feixe de fótons. O outro é a camada deci-redutora (TVL = *Tenth Value Layer*) definido como sendo a espessura de material que atenua de um fator de 10 a intensidade do feixe de fótons.

Os valores de HVL e TVL para os materiais, chumbo e concreto, em função da kilovoltagem pico do tubo de raios X, são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Camada semi-redutoras (HVL) e deci-redutoras (TVL)**

kV Pico	Material Atenuador			
	Chumbo (cm)		Concreto (cm)	
	HVL	TVL	HVL	TVL
<b>50</b>	0,006	0,017	0,43	1,5
<b>100</b>	0,027	0,088	1,6	5,3
<b>200</b>	0,052	0,17	2,5	8,4
<b>300</b>	0,147	0,48	3,1	10,4
<b>400</b>	0,25	0,83	3,3	10,9

**Fonte: Adaptado de Tauhata *et al.* (2013).**

Na análise da Tabela 1 fica evidente que quanto maior a espessura da camada protetora de chumbo, menor é a relação da espessura para a camada de concreto. Na transmissão de energia de 50kV a diferença na espessura dos materiais chega a aproximadamente 72 vezes, enquanto na transmissão de energia de 400kV a diferença na espessura dos materiais chega a aproximadamente 13 vezes.

### 2.1.3 Atenuação

A atenuação pode ser descrita como a absorção de uma energia quando em contato com algum material. O raio X ou fótons de alta energia possuem frequência muito alta, a qual tem sua energia diminuída quando em contato com materiais com

características de atenuação, estes geralmente utilizados nas blindagens radiológicas (CONNOR, 2020).

Conforme explicado por Scaff (1997) *apud* Barros (2009), quando o feixe de raios X é estreito (colimado), o espectro com fótons de energia varia desde zero até um valor máximo. O autor explica que os valores são dados pela energia dos elétrons incidentes no alvo e ressalta que a redução por unidade de absorvedor não é constante.

Para Godoi (2005) quando o feixe de raios X atinge um material, sua energia diminui devido a interação dos fótons com o material, podendo determinar o coeficiente linear de atenuação ( $\mu$ ) a partir da aplicação da equação dada pela Lei de Beer-Lambert, descrita na Equação 1.

$$I = I_0^{-\mu x} \quad (1)$$

A Equação 1 é válida somente para um feixe monoenergético, assumindo que  $I_0$  é a intensidade inicial incidente no material,  $I$  a intensidade de raios X após contato com o material,  $\mu$  é o coeficiente linear de atenuação e  $x$  sendo a espessura do material utilizado na barreira (GODOI, 2005).

Desta forma, um feixe de radiação eletromagnética ionizante é atenuado quando este, ao se propagar por meio da matéria, sofre redução na sua intensidade. Observa-se que há a expectativa de que qualquer material tenha efeitos atenuantes. Com o intuito de se estudar materiais que possam atuar como barreiras, há que se atentar aos fatores que afetam as interações com a matéria, que são: a densidade, a espessura, o número atômico do material e a energia do fóton incidente.

Atualmente existem programas que auxiliam na determinação dos coeficientes de atenuação, através do lançamento de características do material no sistema. Segundo Barros (2009) os coeficientes podem ser determinados através de um programa desenvolvido pelo *National Institute of Standards Technology* chamado Xcom (2008), sendo necessário para determinação dos valores de coeficientes de atenuação a inclusão de informações como as características e composição dos materiais e energia aplicada na amostra.

O coeficiente de atenuação varia de acordo com a característica de absorção de cada material e com a intensidade de energia aplicada. Para Andreucci (2016)

características do material como a espessura, densidade e o número atômico do material influenciam na absorção de energia, bem como a intensidade da energia de radiação eletromagnética incidente. Os dados apresentados na Tabela 2, referem-se aos valores de coeficiente de atenuação dos materiais para diferentes energias de radiação.

**Tabela 2 - Valores do Coeficiente de Atenuação Linear " $\mu$ "**

Energia (MeV)	Energia (keV)	Alumínio 2,7 g/cm <sup>3</sup> (cm <sup>-1</sup> )	Chumbo 12 g/cm <sup>3</sup> (cm <sup>-1</sup> )	Concreto 2,3 g/cm <sup>3</sup> (cm <sup>-1</sup> )	Aço 7,8 g/cm <sup>3</sup> (cm <sup>-1</sup> )
0,102	102	0,444	60,2	0,390	2,700
0,150	150	0,362	20,87	0,327	1,437
0,200	200	0,358	5,00	0,29	1,08
0,300	300	0,278	4,00	0,25	0,833
0,409	409	0,247	2,43	0,224	0,720
0,500	500	0,227	1,64	0,204	0,65

**Fonte: Adaptado de Andreucci (2016).**

Na análise da Tabela 2, para a energia de 150 keV aplicada nos materiais apresentou um coeficiente de atenuação de 0,327 para o concreto e de 20,87 para o chumbo. Observa-se ainda que quanto maior a energia incidida nos materiais, menor é a quantidade de energia absorvida pelo material.

#### 2.1.4 Materiais para Proteção Radiológica

A absorção dos raios X pela matéria se dá pelos efeitos de espalhamento e absorção de energia. Os fatores que afetam as interações com a matéria são a densidade, a espessura e o número atômico do material, bem como a energia do fóton incidente, sendo a taxa de penetração de um material é diferente para cada tipo de fóton (COSTA, 1999).

Conforme Tamaki (2011), as proteções em ambientes radioativos variam de acordo com a energia produzida. Locais com uma energia alta, demandam materiais com maior número atômico. Como a proteção à radiação é uma blindagem física, materiais diferentes têm eficiências diferentes, o que não faz com que um seja melhor que outro. A partir do fator de radiação da sala, calculado por um profissional

habilitado, determina-se a espessura da proteção da solução, seja concreto, ferro ou chumbo.

Para a escolha de um material mais adequado a instalação, além do tipo de radiação emitida, deve-se levar em consideração o espaço físico de instalação, espessura e peso do material, estabilidade, custo de construção, acabamento e limpeza da estrutura. Diferentes materiais como o chumbo, barita e o concreto são comumente utilizados como barreiras de proteção a radiação (PAES DE ANDRADE, 2012).

Diferentes materiais que possuam boas características de atenuação podem ser aplicados para proteção de radiológica. Segundo Lucas e Benatti (2008) materiais como o chumbo, concretos e argamassas especiais, são os mais usados como base das blindagens radiológicas.

Segundo Almeida (2018), os materiais mais comuns utilizados na proteção radiológica são o concreto, aço, chumbo e em algumas situações a terra compactada. Porém pode ser utilizado qualquer tipo de material desde que seja em espessura suficiente para atenuar a energia da radiação. Na escolha dos materiais deve-se levar em consideração o tipo de radiação, espessura e peso próprio da barreira, custo da construção e espaço físico para a instalação da estrutura.

Para construir uma blindagem eficiente contra raios X, é aconselhável que os materiais utilizados na blindagem conttenham algumas características de atenuação e elementos pesados que possibilitem o retardo de nêutrons, como o ferro, cuja massa atômica é 56, ou elementos de número atômico maior. Outro material que possui boas características de blindagem e atenuação tanto de nêutrons quanto para raios gama é o concreto, além de possuir propriedades mecânicas satisfatórias e um custo inicial e de manutenção relativamente baixo (POLIVKA e DAVIS, 1979).

Para Tauhata *et al.* (2013), após o conhecimento do tipo e intensidade de radiação emitida, é possível determinar os materiais utilizados na construção das barreiras, bem como determinar espessuras e as geometrias de proteção radiológica. Conforme Almeida Junior e Antonio Filho (2005), é necessário ter o conhecimento da diferença de densidade específica dos materiais, pois um erro no dimensionamento do projeto de proteção pode acarretar muitas vezes na sobrecarga da estrutura da instalação.



Para o dimensionamento e aplicação dos materiais em projetos de blindagem, deve-se considerar dois tipos de radiação: raios X e raios gama. Ambas as radiações possuem alto poder de penetração e podem ser absorvidos adequadamente por uma massa apropriada de qualquer material. Como a atenuação não é influenciada pelo tipo de material, diferentes materiais com massa igual podem oferecer proteção igual contra raios X e raios gama (METHA e MONTEIRO, 2008).

Para revestimento de ambientes contra a radiação, vários materiais podem ser utilizados como atenuantes desta energia. Além do chumbo, pesquisas com o concreto pesado foram testados para a construção de barreiras protetoras. Em meados dos anos de 1960 e 1980, houve pesquisas referentes a eficiência de barreiras contra a radiação em concretos com adição de agregados com alta densidade, entre estes agregados estão o sulfato de bário (SOUZA, 1992).

#### 2.1.4.1 Placas cimentícias

Placas cimentícias são componentes produzidas através de misturas de materiais como o cimento Portland, fibras de celulose ou sintéticas e agregados, como areia, rochas e celulose em sua fabricação. Estas são constituídas com uma camada entre 16 a 36 milímetros de espessura de concreto leve, com densidade aproximada de  $1400 \text{ kg/m}^3$  (SPECK, 2003 *apud* FRANCO, 2008).

Cichinell (2007) declara que as chapas cimentícias, também conhecidas como placas cimentícias, surgiram na década de 1970, mas foi a partir do desenvolvimento do mercado de construção a seco que começaram a ser mais usadas no país.

As placas são uma opção de fechamento em diversas áreas de aplicação na construção, podendo serem aplicadas em áreas internas e externas, ampliando as opções para os sistemas construtivos, porém suas funções foram além desta aplicação, gerando assim uma ampla versatilidade de uso ao material (SPECK, 2014).

Atualmente a norma brasileira NBR 15.498 (ABNT, 2016) estabelece requisitos mínimos de produção e métodos de ensaio para chapas cimentícias sem amianto produzidos para o mercado nacional. Os parâmetros estabelecidos são quanto a uma padronização das categorias de aplicação das placas cimentícias (ambientes internos ou externos), níveis de resistência, absorção de água e combustibilidade do material.

A base das placas cimentícias é o cimento, material descoberto e patenteado em 1824 por Joseph Aspdin, o cimento Portland é um material obtido através da mistura materiais silicosos e materiais que contenham óxido de ferro, sendo o material resultante, o clínquer. O cimento Portland diferenciam principalmente pela concentração de cinza volante, calcário, sílica ativa e escória. Geralmente os cimentos desenvolvem maiores resistências aos 28 dias (NEVILLE e BROOKS, 2013).

O cimento Portland é um pó fino composto por clínquer e possui com propriedades ligantes que sob a ação da água endurece e fica resistente. Este material possui compostos como calcário, argila, gesso, escória de alto forno, materiais pozolânicos e materiais. A quantidades de adições desses elementos orienta as propriedades de resistência, estabilidade, durabilidade e impermeabilidade do cimento (ABCP, 2018).

O cimento é utilizado como material aglomerante para a produção de concreto, que por sua vez pode ser usado como barreira radiológica. As características do cimento podem ser alteradas quanto a resistência mecânica, resistência a sulfatos e o tempo de pega (ALMEIDA, 2018).

#### 2.1.4.2 Argamassa baritada

A argamassa baritada é composta basicamente por cimento, areia, água e carbonato de bário. Sendo um material muito utilizado como atenuante em barreiras de radiações X. Segundo Freitas *et al.* (2018), este material apresenta algumas vantagens, tais como: a alta eficiência na blindagem de radiação e aplicação de fácil manuseio, podendo também ser facilmente encontrada no mercado nacional. Sua aplicação pode substituir o laminado de chumbo, e sua equivalência chega a 10mm para 1,7mm de chumbo.

Segundo Tamaki (2011), a argamassa baritada é um material muito utilizado para proteção radiológica, é uma argamassa composta por cimento e areia com alguns compostos químicos, entre estes o chumbo. Além de sua característica de atenuação, sua diferença para uma argamassa comum é a cor, um pouco mais marrom e a textura, pois esta é um pouco mais grosseira e difícil de trabalhar. Este material, quando é necessário em espessuras maiores, é difícil de compactar e pode rachar e se soltar. Por isso, é mais usada em salas de baixa energia, como raios X,

sua proporção pode alcançar uma relação de 10:1 com chumbo em locais com pouca radiação, e de 40:1 em ambientes com alto nível de radiação.

Conforme Gondim (2009) *apud* Paes de Andrade (2012), a argamassa baritada é um material composto que pode ter a adição de um minério de alta densidade denominado *barita*, ou sulfato de bário hidratado ( $\text{BaSO}_4$ ) que se presta à proteção radiológica. A sua alta densidade resultante (aproximadamente  $3,2 \text{ g/cm}^3$ ), se comparada à densidade de uma argamassa tradicional, absorve mais radiação. A método de aplicação é manual e, portanto, não se pode garantir a homogeneidade nem a espessura em todas as paredes, sendo esta uma questão bem importante no quesito proteção radiológica.

Uma imagem de barreira de proteção radiológica com aplicação de argamassa baritada nas paredes está ilustrada na Figura 2.

**Figura 2 - Barreira de proteção radiológica com argamassa baritada**



**Fonte: GRX (2020).**

#### 2.1.4.3 Chumbo

O chumbo é um dos metais mais antigos usados, pelo homem, e muitas das primitivas aplicações têm persistido através dos séculos. O chumbo, símbolo Pb, é um metal não elástico, peso específico  $11,37 \text{ g/cm}^3$  e peso atômico 207,2, tem a propriedade de absorver radiações de ondas curtas, tais como, as emanações do rádio ou produzidas pelos raios X (TEIXEIRA e SILVA, 2009).

O chumbo é um elemento químico pertencente ao grupo dos metais pesados, tendo como principais características a boa resistência à corrosão, capacidade em formar ligas metálicas, maleabilidade, e o baixo ponto de fusão. Este material pode ser utilizado principalmente na medicina e ciência (proteção contra raios X), automóveis (revestimento e baterias), construção, plástico, pigmentação (tintas, corantes, esmaltes e maquiagens), armamentos e mineração (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2017).

Um exemplo de barreira de proteção radiológica com aplicação de chumbo nas paredes está ilustrada na Figura 3.

**Figura 3 - Barreira de proteção radiológica com chumbo**



**Fonte: Venetto Ingenieria, 2020.**

O chumbo é um material denso, portanto lençóis ou lâminas de chumbo são difíceis de manusear, possuem baixa resistência mecânica e são muito caros. As mantas de chumbo utilizadas na proteção radiológica devem ser feitas com o elemento com alta pureza. Estas são laminadas na espessura necessária para proteção das paredes e portas (GONDIM, 2009 *apud* PAES DE ANDRADE, 2012).

#### 2.1.4.4 Ferro fundido

O ferro fundido é basicamente uma liga de ferro com teores de carbono geralmente acima de 2,1%, diferentemente do aço, que também é uma liga metálica

formada de ferro e carbono, mas com porcentagens entre 0,002% a 2,11%. Conforme Stefanescu (1998) *apud* Serbino (2005), ferros fundidos são ligas a base de ferro-carbono, que geralmente contém quantidades consideráveis de silício (Si), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S) com traços de titânio (Ti), antimônio (Sb) e estanho (Sn), entre vários outros elementos de liga. As propriedades do ferro fundido podem variar com a relação carbono-silício, pela adição de elementos de liga metálicos e não metálicos de acordo com o tipo de processamento, bem como o uso de tratamentos térmicos posteriores a sua solidificação.

Para Almeida (2018), o ferro fundido possui uma densidade elevada pode ser utilizado como agregado na produção de concretos pesados para a aplicação em proteções radiológicas.

#### 2.1.4.5 Concreto

O concreto é um produto formado através de uma combinação de cimento hidráulico e água (pasta de cimento) e alguns agregados como areia e brita. Povos mais antigos como os romanos, utilizavam um material baseado em um cimento hidráulico em suas construções, o qual endurecia com a ação da água. Com o passar do tempo diferentes tipos de concreto foram desenvolvidos para usos específicos. Em geral, a matriz cimentícia é modificada de maneira a melhorar algumas propriedades específicas (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Conforme Watanabe (2008) *apud* Vargas (2018), o concreto é um excelente material para a blindagem de raios X, pois possui propriedades mecânicas satisfatórias e tem relativamente baixo custo inicial e de manutenção. A blindagem deve conter algum material pesado, como ferro ou elementos de maior número atômico. Os concretos pesados são produzidos com o uso de agregados pesados naturais, e os agregados graúdos mais comuns utilizados para a confecção destes concretos são a barita, magnetita e hematita.

A análise elementar do concreto comum apresenta oxigênio, silício, cálcio e hidrogênio, além de outros elementos. O oxigênio e o hidrogênio, ambos de baixo peso atômico, freiam os nêutrons, sendo o hidrogênio 120 vezes mais ativo que o oxigênio. E para barrar nêutrons rápidos, é necessário incorporar agregados à base de ferro, ou de chumbo, ou mesmo de bário (PETRUCCI, 1981).

O concreto comum tem a vantagem do baixo custo e da facilidade de construção e a desvantagem da sua blindagem ser bastante espessa, devido ao número atômico e densidade relativamente baixa. O concreto comum possui um peso aproximado de  $2,35\text{g/cm}^3$ , qualquer variação na densidade do concreto acarreta um ajuste na espessura calculada. O concreto de alta densidade pode ser usado como uma alternativa quando o espaço é limitado (GONDIM, 2009 *apud* PAES DE ANDRADE, 2012).

O concreto pesado, com densidade aproximada de  $(3,6\text{ g/cm}^3)$ , é normalmente utilizado para blindagem biológica nas usinas nucleares, nas unidades médicas e nas instalações de testes de pesquisa atômica. Outros materiais podem ser utilizados com esta finalidade, mas o concreto é normalmente o mais econômico e tem muitas outras vantagens, como por exemplo a sua fácil aplicação. Paredes maciças de concreto convencional são usadas com a finalidade de blindagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Para Tamaki (2011), existe a possibilidade de se tratar o concreto para funcionar como blindagem. Porém é um processo mais caro e dependendo das atividades do edifício se torna inviável devido a constante alteração de equipamentos e *layout*. De qualquer forma, em toda a execução, independentemente do material escolhido, os pontos mais importantes são manter a espessura mínima definida em projeto e não deixar nenhuma falha, nenhum ponto sem proteção.

Para Watanabe (2008) *apud* Vargas (2018), agregados como a barita, fosfetos de ferro e aço podem ser utilizados para a confecção de concretos devido a sua composição, porém deve-se ter cuidados especiais na dosagem da mistura. Para isso, é desejável que tanto o agregado miúdo quanto o agregado graúdo sejam produzidos com rochas e minerais de alta massa específica, fatores que diminuem a segregação do concreto. Concretos de trabalhabilidade normal podem ser dosados com densidades elevadas com o uso de agregados pesados como minério de ferro, agregados de ferro ou aço, barita.

Conforme NBR 7211 (ABNT, 2009) os agregados são materiais oriundos de britagem de materiais duros e são classificados em miúdos menores de 4,75mm, graúdo acima de 4,75mm. Podem ser naturais (extraído da natureza), artificiais (fragmentação de materiais naturais), e industriais (extraídos a partir de processos industriais e de beneficiamento).

O concreto convencional, geralmente produzido a partir de cimento, areia, brita e uma porcentagem de água, possui como característica um baixo teor de densidade e número atômico, este pode ser utilizado como barreira radiológica, porém devido as suas características estima-se grandes espessuras na estrutura de blindagem. Já os concretos pesados, além dos materiais convencionais, são utilizados agregados graúdos com alto teor de densidade, e desta maneira há uma diminuição na espessura da barreira radiológica (ALMEIDA, 2018).

Uma barreira de proteção radiológica com a aplicação de concreto nas paredes e teto está ilustrada na Figura 4.

**Figura 4 - Barreira de proteção radiológica com concreto**



**Fonte: Mapa da Obra, 2020.**

### 2.1.5 Resíduos

O termo resíduo originou-se do latim “resíduo” e significa resto. Os resíduos sólidos, uma das formas da poluição industrial, não se restringem apenas às etapas produtivas, podendo haver descarte de materiais não utilizados na indústria no meio ambiente, evidenciando perdas de matérias-primas e insumos (JACOMINO *et al.*, 2002).

Conforme o Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução nº 313 – (CONAMA, 2002), entende-se como resíduo sólido industrial todo o resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semi-sólido, gasoso - quando contido, e líquido - cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso

soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.

O reuso e a reciclagem de resíduos têm um potencial de crescimento muito grande, principalmente nos países em desenvolvimento. Neste cenário, a reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade, seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor seja reduzindo os custos (LUCAS e BENATTI, 2008).

Segundo Fonseca (2010), vale destacar que para a produção de argamassas e concretos pode-se utilizar resíduos reaproveitados de processos industriais. As adições minerais têm sido utilizadas como insumo para a construção civil de forma cada vez mais intensa nas últimas décadas, e que a adição deste composto resulta na produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas, uma vez que modificam a estrutura interna do concreto no estado fresco.

A utilização de resíduos pela indústria da construção civil está se tornando cada vez mais importante, agregando importantes valores econômico, ambiental e técnico quanto com relação ao desenvolvimento de pesquisas referentes ao assunto. Ainda de acordo com Fonseca (2010), existem várias vantagens técnicas, econômicas e ambientais quanto a utilização das adições minerais, torna-se relevante e necessária uma análise mais aprofundada das posturas adotadas no Brasil sobre as adições minerais como substitutivo parcial ao cimento nos concretos.

Para Dal Molin (2005), os resíduos provenientes de obras da construção civil são compostos basicamente argamassa, tijolos, blocos, cacos cerâmicos, pedra, areia, metálicos e plásticos. Os resíduos quando selecionados e tratados de maneira adequada podem ser adicionados no cimento e utilizados como agregados no concreto.

A reciclagem é a introdução do resíduo no seu ciclo de produção em substituição total/parcial de uma matéria-prima. As formas adequadas de aproveitamento de resíduos, ou de subprodutos industriais, como matéria-prima secundária, devem envolver um completo conhecimento do processo as unidades de geração dos resíduos, a caracterização completa dos resíduos e identificação do



potencial de aproveitamento, identificando as características limitantes do uso e da aplicação (ROCHA, 2003).

Ainda de acordo com Rocha (2003), por força de organismos nacionais e internacionais de controle do meio ambiente, a questão da reciclagem e reaproveitamento de resíduos passou a ser estratégica em termos das políticas econômica e industrial. A implantação de modelos de produção mais limpa em processos industriais tem sido também um importante elemento na minimização dos resíduos gerados, como também tem tornado possível uma intervenção dos centros de pesquisa na solução do problema e na identificação de matérias-primas secundárias para o desenvolvimento de materiais. A indústria da construção civil apresenta-se, dentro deste contexto, com um grande potencial para a solução desses problemas, pela viabilidade que apresenta de incorporação desses resíduos nos materiais de construção, possibilitando, ainda, redução nos custos dos produtos da construção. O aumento no descarte de rejeitos sólidos, bem como os problemas advindos da exaustão de matérias-primas naturais, vem impulsionando os estudos sobre o aproveitamento desses resíduos como novos materiais, reduzindo o seu impacto ambiental e viabilizando a redução de custos industriais e a criação de novos empregos.

#### 2.1.5.1 Resíduos utilizados em placas cimentícias em geral

Nos últimos anos houve um aumento na aplicação de resíduos na produção de produtos principalmente para a construção civil, porém há menor ênfase em pesquisas com foco na aplicação de resíduos industriais para o aproveitamento em proteções a radiação.

#### 2.1.5.2 Resíduos utilizados em placas cimentícias utilizadas como barreira radiológica

Resíduo específico deste trabalho, a limalha de ferro fundido ou particulado de ferro é originado de atividades de usinagem ou outros processos industriais e sem muita utilização ou aplicação em outro processo de produção, em geral produzidas pela fricção de lima sobre o ferro.

O resíduo de limalha de ferro fundido se origina através do processo de torneamento, faceamento e furação e de peças brutas que chegam na indústria para este processo de usinagem.

As imagens do processo de usinagem das peças e origem das limalhas de ferro fundido estão ilustradas na Figura 5.

**Figura 5 - Imagens do processo de usinagem das peças e origem das limalhas de ferro fundido**



(a)



(b)



(c)



(d)

**Fonte: O autor (2021).**

Conforme ilustrado na Figura 5, o processo de usinagem gera resíduos devido ao seu processo de fabricação de peças de ferro e aço. A Figura (5a), ilustra uma

central de usinagem e uma máquina-ferramenta que utiliza ferramentas de corte de haste como: broca, fresa de topo, alargador, macho de roscar, cabeçotes fresadores, entre outras; A Figura (5b), uma peça acabada após usinagem; Nas Figuras (5c e 5d), o armazenamento do resíduo de ferro originado na usinagem das peças fabricadas.

Com base nos dados extraídos em visita técnica em indústria metalúrgica, situada no município de São José dos Pinhais, Estado do Paraná, nos últimos 5 (cinco) anos foram gerados cerca de 140 toneladas de resíduo originadas da produção de peças industriais. Atualmente os resíduos de ferro fundido, em sua grande maioria limalhas de ferro, são destinadas a empresas licenciadas e responsáveis pelo beneficiamento e reaproveitamento do mesmo.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos de ensaios utilizados nesta pesquisa. A descrição dos materiais foi dividida em duas etapas:

- Material relativo aos moldes e;
- Materiais relativos às placas.

O método foi dividido em cinco etapas:

- Definição do protótipo de pesquisa;
- Preparo dos moldes;
- Caracterização e ensaios físicos dos materiais;
- Método de preparo das placas e;
- Testes e ensaios de atenuação.

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram obtidos por meio de recursos da UTFPR, advindos dos Laboratórios de Materiais e de Física Nuclear Aplicada por meio dos respectivos departamentos e de projetos vinculados.

#### 3.1.1 Materiais para a Fabricação do Molde

Os materiais utilizados na fabricação do molde foram aplicados de maneira que a peça final (molde) apresentasse como características principais a resistência mecânica (resistente a rasgo e deformações) para moldagem das placas para estudo, fácil trabalhabilidade, pouca aderência após curado, bem como a flexibilidade para desmoldagem das peças quando curadas no interior da forma. Os materiais utilizados para a produção do molde de borracha estão listados a seguir.

- Bastidor preparado com compensado de madeira de 3mm de espessura com dimensões externas de 30cm x 30cm (quadrado maior) e 21cm x 21cm (quadrado menor) montadas artesanalmente como pode ser visualizado na Figura 6;

- 4kg de borracha líquida de silicone;
- Catalizador para borracha líquida;
- Desmoldante (vaselina líquida).

**Figura 6 - Bastidor de madeira para confecção do molde**



**Fonte: O autor, 2021.**

O molde de borracha é utilizado para a produção das placas cimentícias, concreto e argamassa baritada. A única placa construída de maneira diferenciada é a peça de chumbo, como é descrito em item subsequente.

### 3.1.2 Materiais para Fabricação das Placas

Os materiais utilizados na fabricação das placas, foram selecionados de maneira que atendessem os traços dos materiais já utilizados como barreiras radiológicas, e para os traços das placas desenvolvidas neste estudo.

#### 3.1.2.1 Placa de argamassa comum

- Cimento Portland tipo CP II-F 32;
- Areia média padronizada com diâmetro entre 0,42 a 2mm;

- Água.

#### 3.1.2.2 Placa de concreto

- Cimento Portland tipo CP II-F 32;
- Areia média padronizada com diâmetro entre 0,42 a 2mm;
- Brita zero (ou pedrisco), dimensões entre 4,8mm a 9,5mm;
- Água.

#### 3.1.2.3 Placa de argamassa baritada

- Argamassa baritada em pó (densidade: 3,2g/cm<sup>3</sup>);
- Água.

#### 3.1.2.4 Placa de chumbo

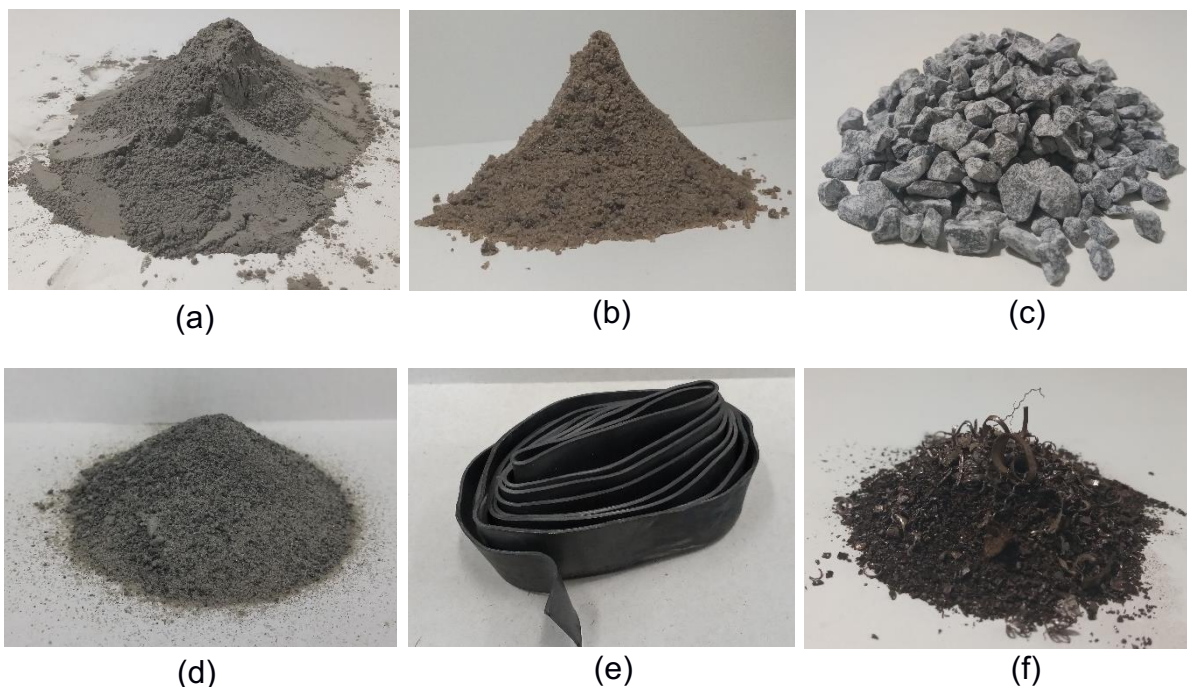
- Placa original de chumbo, dimensões: 1500mm de comprimento, 20mm de largura, 1mm de espessura e teor de pureza de 99,8%.

#### 3.1.2.5 Placas de argamassa com limalha de ferro

- Cimento Portland tipo CP II-F 32;
- Areia média padronizada com diâmetro entre 0,42 a 2mm;
- Limalha (cavacos) de ferro fundido (Origem: empresa metalúrgica situada no município de São José dos Pinhais – Paraná). Para a confecção das placas, foram utilizados 03 (três) granulometrias diferentes, sendo 0,6 milímetros, 1,2 milímetros e 2,4 milímetros;
- Água.

Os materiais utilizados para a produção das placas para os ensaios de atenuação, (a) cimento Portland; (b) areia média; (c) brita zero ou pedrisco; (d) Argamassa Baritada (pó); (e) fita de chumbo; (f) limalha de ferro fundido *in natura*, estão ilustrados na Figura 7.

**Figura 7 - Materiais utilizados para a produção das placas, da maneira com que se apresentam comercialmente**



**Fonte: O autor, 2021.**

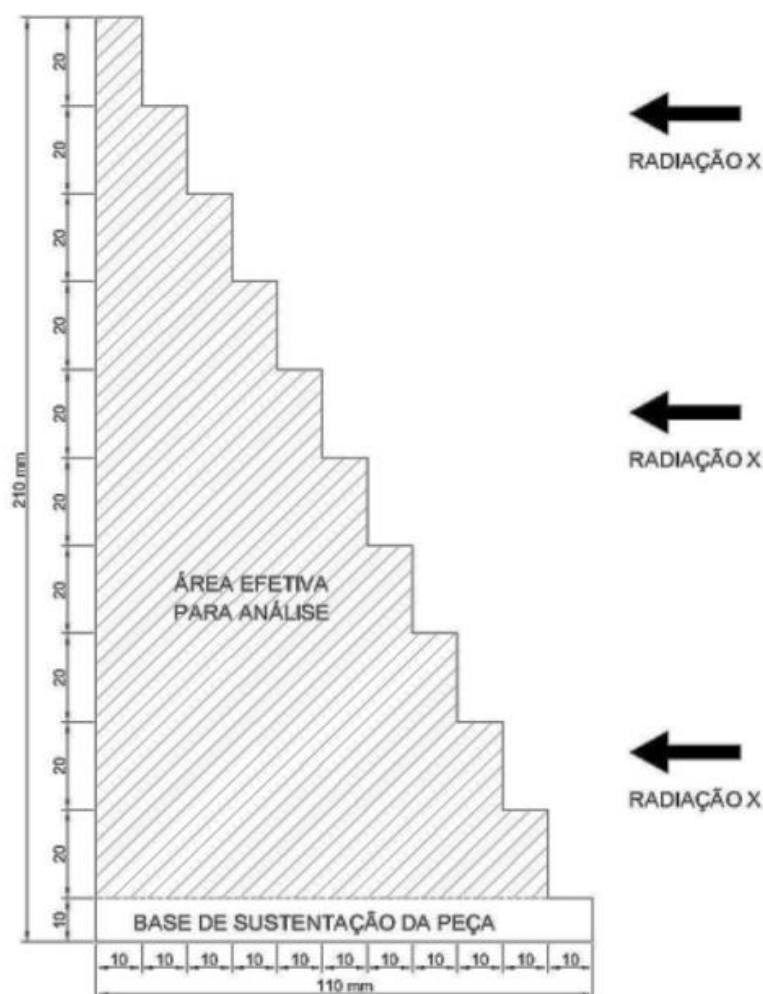
Observa-se na Figura (7f) que a limalha de ferro fundido, obtida em indústria de fundição, possui granulometria variada. Todavia o resíduo utilizado, embora por si não esteja padronizado em suas dimensões, em relação à produção é bastante padronizado, o que oferece a esta pesquisa um resultado que pode ser estendido aos resíduos de indústrias similares. Para a produção das amostras com adição de limalha, foi necessário o peneiramento do material e a escolha de 3 granulometrias. Para as placas cimentícias foi escolhido o cimento Portland tipo CP II-F por ser indicado para a aplicação em concreto simples, concreto armado, elementos pré-moldados e pisos. A dosagem de água aplicada nas misturas (inferior a 10%) foi definida com base nas porcentagens médias aplicadas na produção do concreto convencional de 25 Mpa.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Definição do Protótipo de Pesquisa

Primeiramente determinou-se as dimensões das placas para que possibilitassem uma análise da atenuação dos raios X em diferentes espessuras. Para isto, foram projetadas placas com degraus gradativos de 10 mm de base e 20 mm altura (iniciando o primeiro com 10 mm e terminando com 100 mm de base, de cima para baixo). A área para análise de atenuação em cada degrau será de 5 cm<sup>2</sup>. Um esquema das placas, para a incidência dos raios passíveis de atenuação em escala, está ilustrado na Figura 8.

**Figura 8 - Desenho esquemático das placas para incidência de raios X**



Fonte: O autor, 2021.



Ressalta-se que as placas relativas a este esquema valem para as placas cimentícias, argamassa baritada, concreto comum e argamassa com limalha de ferro fundido.

### 3.2.2 Preparação do Molde

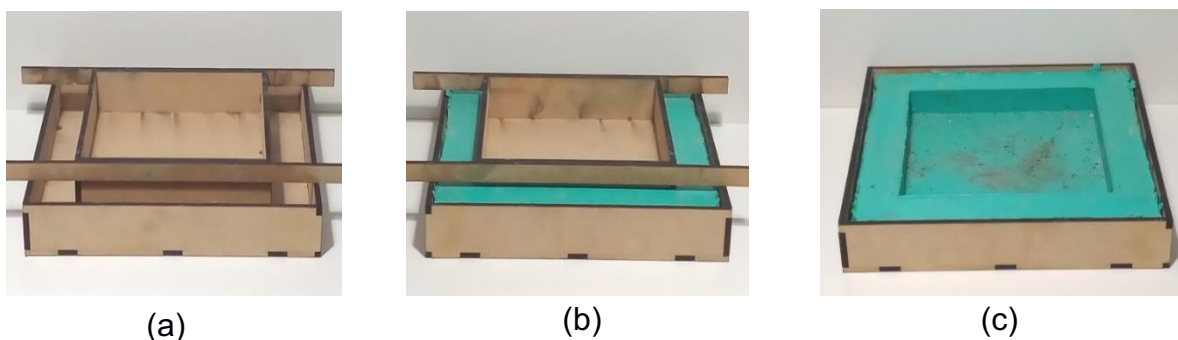
Para a fabricação das placas cimentícias, argamassa baritada, concreto comum e argamassa com limalha de ferro foi utilizada um molde de silicone cujo preparo é descrito a seguir.

A partir das características determinadas para as placas (Figura 8) foi desenvolvido um molde confeccionado com borracha líquida (silicone), com dimensões externas de 30cm x 30cm, dimensões internas de 21cm x 21cm, altura da borda de 5,0cm e altura do fundo interno de 2,5cm, conforme Figura 9.

Para a execução do molde de borracha foi utilizado o bastidor (Figura 6) que consiste em duas caixas de madeira, as quais foram encaixadas uma dentro da outra de maneira a dar o formato desejado para o molde de borracha.

Após o encaixe das peças, foi aplicado vaselina na madeira (para facilitar o desmolde) e em seguida a borracha de silicone líquida, adicionada do catalizador e homogeneizada, foi lançada dentro da forma até a altura da borda externa. A porcentagem de catalizador aplicada no material seguiu orientação do fabricante. O tempo de cura foi de 24 horas e em temperatura ambiente de aproximadamente 20°C. As etapas da fabricação do molde estão ilustradas na Figura 9.

**Figura 9 - Imagens das etapas de preparo do molde de borracha**

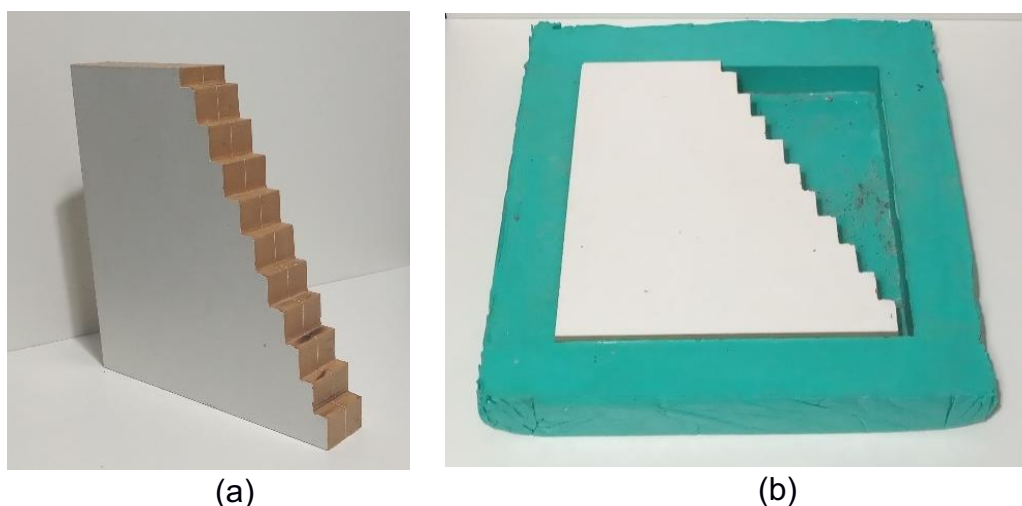


Fonte: O autor, 2021.

Estão ilustradas na Figura (9a) as formas de madeira encaixas uma sobre a outra; (9b) fôrmas de madeira com a aplicação da borracha de silicone; (9c) fôrma de madeira com o molde de silicone curado. Após a cura da borracha, foi realizado o desmolde e limpeza do molde de borracha.

Para a conformação das placas com os referidos degraus foi preparada uma peça de madeira para acoplamento que consiste em um quadrado de 21cm x 21cm e espessura de 2,5cm de onde foi removida uma parte para configurar degraus de 1cm de base e 2cm de altura, conforme Figura 10.

**Figura 10 - Peça de madeira para acoplamento**



(a)

(b)

**Fonte: O autor, 2021.**

Estão ilustradas na Figura (10a) a vista lateral da fôrma de madeira em MDF a qual é encaixada no interior do molde de borracha, a qual tem como função dar a forma as placas de cimento, concreto e argamassa baritada; (10b) forma de madeira encaixada no interior do molde de borracha.

### 3.2.3 Caracterização e Ensaio Físicos e Mecânicos dos Materiais

A caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa é referente a ensaios de determinação granulométrica, massa específica, atenuação, e de resistência à compressão das peças em análise. Para a determinação granulométrica dos materiais

em laboratório, foram utilizadas as recomendações presentes na NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para o material chumbo não foram realizados os ensaios de granulometria e resistência à compressão.

Para a caracterização inicial dos materiais houve a secagem, pesagem e peneiramento dos mesmos (exceto o chumbo). Para a secagem da areia, foi utilizada uma estufa, com temperatura de secagem a 110°C, e após seca a areia, a mesma foi resfriada em temperatura ambiente. Para os demais materiais (cimento, barita, pedrisco e limalhas de ferro fundido não houve a necessidade da realização do processo de secagem.

A determinação da massa específica foi realizada por meio de um multiplicnômetro de Hélio, com base nas recomendações da normativa ASTM B923-02 (2002).

Para a determinação da resistência à compressão de corpos de prova, a pesquisa tomou por base as orientações da NBR 7215 (ABNT, 2019). As avaliações das resistências foram tomadas aos 28 dias, em prensa hidráulica universal com capacidade de 30.000 kgf de trabalho.

### 3.2.3.1 Caracterização Granulométrica

Para a caracterização granulométrica, foi necessário a realização da pesagem e peneiramento dos materiais. A pesagem dos materiais foi realizada em balança digital de precisão de 0,1g, seguindo as recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para os materiais com dimensões inferiores a 4,8 mm, foi utilizado 0,5 kg de massa e para os agregados graúdos foi utilizado 3,0 kg de massa.

Para o peneiramento dos materiais, foram utilizadas peneiras sucessivas entre 0,150mm a 12,5mm, tanto da série normal quanto da série intermediária, tampa e fundo. Para auxílio no peneiramento dos materiais, foi utilizado um peneirador eletromagnético.

A análise granulométrica é o processo de separar uma amostra do material em frações de partículas de mesma dimensão. O material é classificado por meio da agitação ou vibração de peneiras empilhadas uma sobre a outra em ordem decrescente, por um tempo especificado, de maneira que o material fique retido e

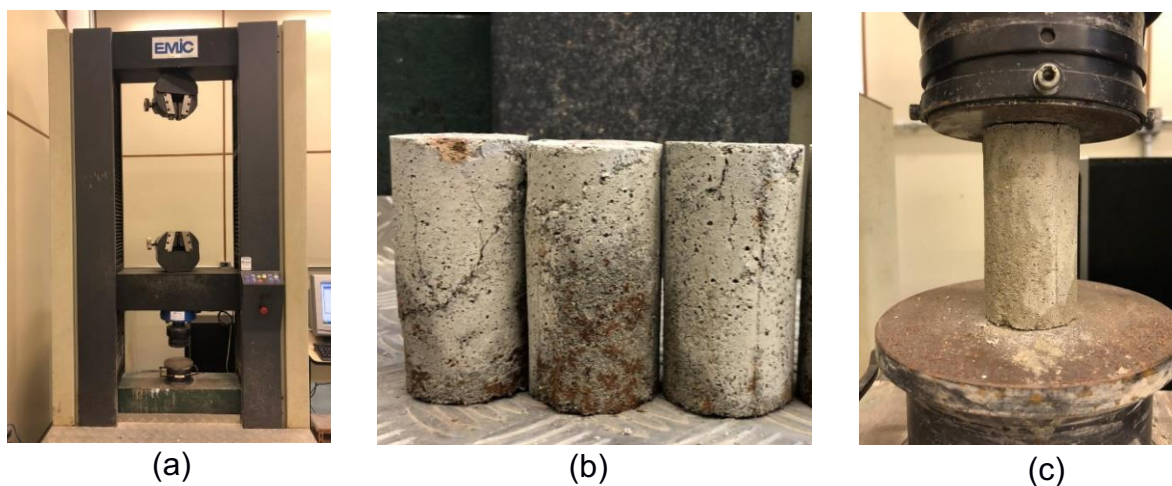
acumulado nas peneiras, estas geralmente construídas com malhas de aço e variam suas dimensões conforme normas específicas (NEVILLE e BROOKS, 2013).

### 3.2.3.2 Caracterização da Resistência à Compressão

A moldagem e ensaio de compressão dos corpos de prova cilíndricos, de dimensões de 5cm x 10cm, seguem os parâmetros da NBR 7215 (ABNT, 2019), como por exemplo, moldagem de 4 corpos de prova para cada traço, exceto o chumbo.

Antes do ensaio de compressão, os corpos de prova foram submetidos ao processo de cura úmida de 7 dias e ruptura mecânica aos 28 dias. Para o ensaio de compressão axial, foi utilizado uma prensa hidráulica universal com capacidade de 30.000 kgf de trabalho, e velocidade de carregamento equivalente a 0,25 MPa/s. O cenário de realização dos ensaios de compressão em laboratório é ilustrado na Figura 11.

**Figura 11 - Ensaio de compressão em corpos de prova em laboratório**



**Fonte: O autor, 2021.**

Estão ilustradas na Figura (11a) a prensa hidráulica universal; (11b) três corpos de prova de material cimentício; e (11c) ensaio do corpo de prova em prensa hidráulica.

### 3.2.4 Preparo das Placas

As placas produzidas para os ensaios de raios X, tem como objetivo analisar a eficiência dos diferentes materiais na atenuação da radiação. Para tanto, foram produzidas 16 amostras conforme descritas na Tabela 3, sendo quatro de materiais já utilizados para atuar como barreira radiológica, destas são: uma amostra de concreto, uma amostra de argamassa de cimento, uma amostra de argamassa baritada e uma amostra de chumbo e, doze amostras de um material a base de cimento e resíduo de ferro fundido com diferentes traços, sendo quatro amostras para cada granulometria de 0,6mm; 1,2mm e 2,4mm. Os traços foram definidos a partir de um traço comumente utilizado em placas de cimento e a partir deste foram feitas substituições gradativas da areia por limalha.

**Tabela 3 - Placas intituladas de acordo com suas características e respectivos traços**

Identificação	Placa	Materiais					
		Água	Cimento	Areia	Brita	Limalha	Barita
Traço 1	Concreto*	5,0	10	25	60	0	0
Traço 2	Argamassa Comum	0,5	1,0	3,0	0	0	0
Traço 3	Chumbo 99%	0	0	0	0	0	0
Traço 4	Argamassa Baritada*	5,0	7,24	0	0	0	87,76
Traço 5	Limalha 0,6	0,5	1,0	2,5	0	0,5	0
Traço 6	Limalha 0,6	0,5	1,0	2,0	0	1,0	0
Traço 7	Limalha 0,6	0,5	1,0	1,5	0	1,5	0
Traço 8	Limalha 0,6	0,5	1,0	1,0	0	2,0	0
Traço 9	Limalha 1,2	0,5	1,0	2,5	0	0,5	0
Traço 10	Limalha 1,2	0,5	1,0	2,0	0	1,0	0
Traço 11	Limalha 1,2	0,5	1,0	1,5	0	1,5	0
Traço 12	Limalha 1,2	0,5	1,0	1,0	0	2,0	0
Traço 13	Limalha 2,4	0,5	1,0	2,5	0	0,5	0
Traço 14	Limalha 2,4	0,5	1,0	2,0	0	1,0	0
Traço 15	Limalha 2,4	0,5	1,0	1,5	0	1,5	0
Traço 16	Limalha 2,4	0,5	1,0	1,0	0	2,0	0

\* traço em %

Fonte: O autor, 2021.

Para todas as placas cimentícias, concreto e argamassa baritada foi utilizado o molde de borracha que permite que as mesmas tenham o formato em degraus conforme especificado no protótipo de pesquisa. A amostra do material chumbo, não foi produzida em molde de borracha, foi confeccionada através de uma fita de chumbo, a qual foi cortada e colada uma sobre a outra, obedecendo as dimensões de altura do protótipo, alterando apenas a espessura dos degraus a cada milímetro.

Os traços para as argamassas e concreto foram pré-definidos a partir dos traços de argamassas e concretos comuns utilizados na construção civil. Os processos de moldagem das argamassas e produção dos corpos de prova estão ilustrados na Figura 12.

**Figura 12 - Processos de moldagem das placas e corpos de prova**



**Fonte: O autor, 2021.**

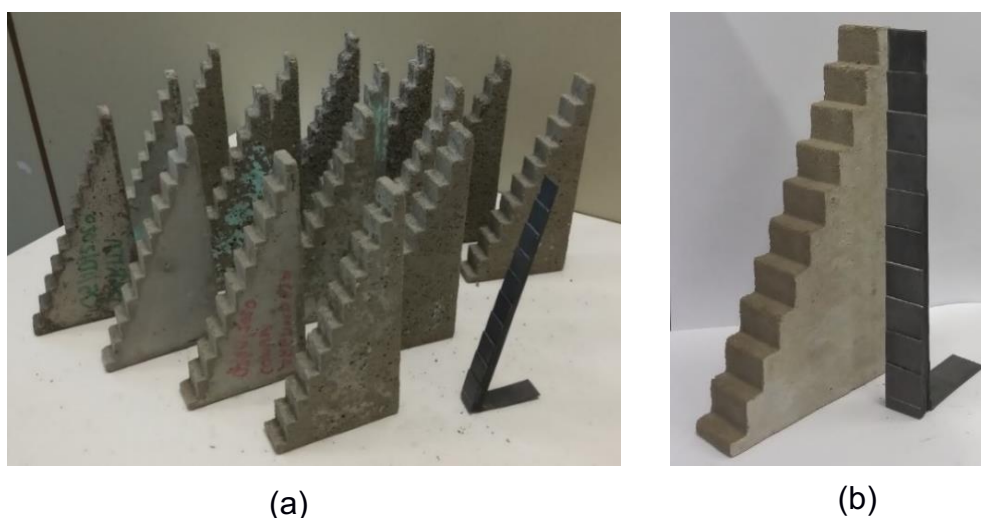
Estão ilustradas na Figura (12a) a argamassa lançada no molde de borracha para a produção da placa e em cilindros metálicos para a produção dos corpos de prova ; (12b) placas e corpos de prova. Para análise da resistência à compressão dos materiais estudados, foram produzidos 60 corpos de prova em molde.

As amostras foram produzidas de maneira similar quanto a preparação do molde (limpeza e encaixe da peça de MDF), aplicação de desmoldante no interior do molde, a mistura dos materiais em um recipiente, o lançamento das argamassas junto ao molde, desforma e cura, variando apenas nos traços das amostras, conforme

ilustrado na Tabela 3. A amostra do material chumbo, foi produzida a partir de uma fita de chumbo com espessura de um milímetro, recortada e colada uma sobre a outra. As dimensões das amostras seguiram o modelo de protótipo ilustrado na Figura 8.

O tempo de cura das placas produzidas em molde foi de 24h. Depois do desmolde a placa ficou na bancada em temperatura ambiente para cura total do material. A Figura 13 ilustra as amostras produzidas para a pesquisa.

**Figura 13 - Amostras produzidas em molde e amostra de chumbo**



**Fonte: O autor, 2021.**

Estão ilustradas na Figura (13a) as amostras produzidas em molde de borracha e mesmas dimensões, exceto a de chumbo; (13b) amostras de uma peça cimentícia produzida em molde e uma peça de chumbo produzida com a fita.

Com relação ao material ferro fundido utilizado na produção das amostras 05 a 16 (Tabela 3), o mesmo foi obtido *in natura*, na forma de cavacos (Figura 05, (c) e (d)). O resíduo foi peneirado em peneiras com malhas de 2,4mm (grossa), 1,2mm (média) e 0,6mm (fina). O resíduo de ferro foi utilizado como substituto da fração do agregado miúdo, na proporção de dosagem de 0,5 a 2 em relação à quantidade de areia. Estão ilustradas na Figura 14 as granulometrias de limalha de ferro utilizadas na preparação das amostras.

**Figura 14 - Limalhas de ferro**

**Fonte: O autor, 2021.**

A Figura (14a) ilustra o resíduo de limalha de ferro fundido *in natura*; (14b) o material limalha de ferro fundido em três granulometrias após o peneiramento (2,4mm; 1,2mm e 0,6mm). O resíduo de ferro foi utilizado como substituto da fração do agregado miúdo de areia originalmente de traço com 0,5 porção de água; 1,0 de cimento e 3,0 de areia (traço da amostra de argamassa de cimento), onde substituiu-se frações variando 0,5; 1; 1,5 e 2, como já descrito na Tabela 3.

### 3.2.5 Testes e Ensaios de Atenuação

O ensaio de atenuação dos materiais teve como objetivo a obtenção de imagens (tons de cinza) as quais podem ser utilizados para determinar os valores de absorção dos materiais. Para a análise das amostras foi utilizado o tipo de ensaio não destrutivo e quatro diferentes intensidades de energia de raios X, sendo 70 keV, 90 keV, 125 keV e 160 keV, exceto para a amostra de chumbo onde as energias foram de 160 keV, 188 keV e 200 keV, pelo fato da mesma possuir alta densidade.

As energias aplicadas se devem a dois fatores: à disponibilidade do LACTEC e, à faixa de energias utilizadas mais comumente em laboratórios, clínicas e indústria.

Foram analisadas 16 amostras conforme traços apresentados na Tabela 3. Para o ensaio de atenuação das amostras foi utilizado um equipamento gerador de raios X milifoco com alvo de Tungstênio, operando em até 200 keV, instalado em uma cabine blindada nas dependências do Instituto LACTEC.

Quanto ao arranjo experimental foi necessária a utilização de um equipamento gerador de raios X, painel detector de raios X, mesa giratória e suporte para



acomodação das amostras. O detector de raios X, é um detector digital de silício amorfo (aSi), com sensibilidade de 20 keV a 15 MeV. A distância entre o equipamento gerador de energia e a amostra foi de noventa centímetros. Está ilustrada na Figura 15 a disposição dos equipamentos e amostras no interior da cabine blindada para o ensaio.

**Figura 15 - Disposição dos equipamentos e amostras para o ensaio**

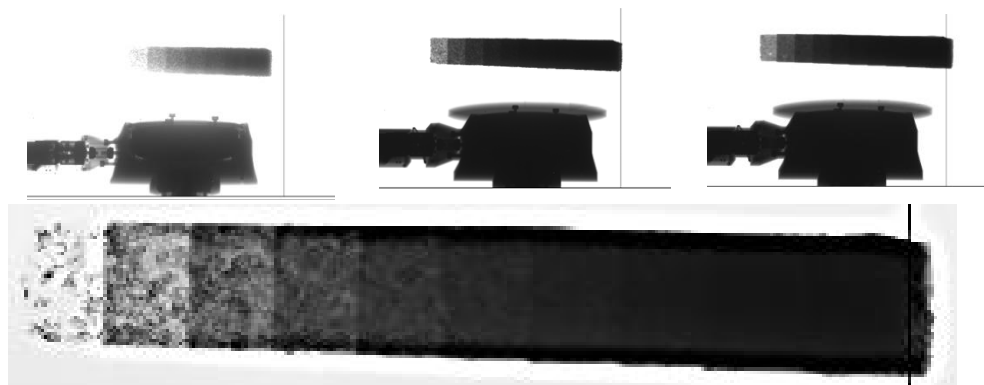


**Fonte: O autor, 2021.**

À esquerda, na Figura 15, está o equipamento gerador de raios X; no centro mais à direita está a amostra sobre uma peça de espuma, utilizada para posicionar a amostra durante a aplicação da radiação e; à direita, atrás da mesa de suporte e amostra, está o painel detector de raios X.

Após o ensaio foram fornecidas as imagens as quais compreendem 65536 tons de cinza, nas dimensões (2048x2048) pixels. Para visualização das imagens e verificação dos valores de tons de cinza, foi utilizado o programa ImageJ e verificado o valor (tons de cinza) de cada degrau e cada energia. Quanto mais claro o tom de cinza, mais energia transpassou no material e quanto mais escura a cor, menos energia passou pela amostra. Estão ilustradas na Figura 16 imagens obtidas no ensaio de atenuação e apresenta tons de cinza.

**Figura 16 - Imagens obtidas no ensaio de atenuação e apresenta tons de cinza**



**Fonte: O autor, 2021.**

Na Figura 16 estão demonstradas imagens captadas pelo painel detector sob o ponto de vista de uma visão lateral do arranjo utilizado no ensaio. Na parte inferior encontra-se a mesa giratória e na parte superior as amostras. O espaçamento entre a mesa e a amostra é referente a espuma utilizada para apoio e posicionamentos das amostras. Em cima, nas imagens, aparece uma escala de tons de cinza relativas à cada placa ensaiada, e reproduzida em tamanho maior, na parte inferior, para melhor ilustração. Ressalta-se que a atenuação, representada pelos tons de cinza, ocorre de forma exponencial, havendo necessidade de linearização dos dados para posterior ajuste de reta.

Estas imagens são parte do acervo extraído do ensaio, ao todo foram produzidas sessenta e quatro imagens, pois cada uma das dezesseis amostras foram ensaiadas com 4 intensidades de energia diferentes (70 keV, 90 keV, 125 keV e 160 keV) em geral e (160 keV, 188 keV e 200 keV) para o chumbo, como mencionado. As demais imagens captadas estão anexadas junto ao ANEXO B desta pesquisa.

A atenuação da energia de raios X ocorre de forma exponencial no material, em relação à espessura do material. Nesse sentido, pode-se ajustar curvas exponenciais para se determinar o coeficiente de atenuação de cada material. Ou primeiramente linearizar os dados e ajustar uma reta com o mesmo intuito.

Para os cálculos foram identificadas as espessuras médias das camadas e erros associados, onde para cada uma das espessuras, foi calculada a relação entre a intensidade de tons de cinza da camada (final) e a inicial, com erros associados. Em

seguida, linearizou-se os dados por meio do cálculo do logaritmo neperiano. A Figura 17 ilustra uma parte destes cálculos realizados em programa Excel (Microsoft Excel).

**Figura 17 - Amostra parcial dos cálculos**

1 cm		2cm		3cm		4cm		5cm	
A		A		A		A		A	
160KV 4 mA 4pF		160KV 4 mA 4pF		160KV 4 mA 4pF		160KV 4 mA 4pF		160KV 4 mA 4pF	
I1	56.854.595	I2	36.901	I3	24.029.617	I4	17.592.583	I5	12.683.376
dsv padrão I1	1.491.083	dsv padrão I2	2.343.793	dsv padrão I3	1.301.492	dsv padrão I4	1.016.108	dsv padrão I5	895.459
Io	62.186.733	Io	61.544.991	Io	61.646.913	Io	61.771.816	Io	61.540.039
dsv padrão Io	54.409	dsv padrão Io	31.897	dsv padrão Io	56.857	dsv padrão Io	222.159	dsv padrão Io	83.530
I/lo	0,91425602	I/lo	0,000599578	I/lo	0,389794328	I/lo	0,284799511	I/lo	0,206099577
ln I/lo	-0,089644638	ln I/lo	-7,419285096	ln I/lo	-0,942136044	ln I/lo	-1,25596982	ln I/lo	-1,579395844
erro I/lo	0,02397751	erro I/lo	0,038082596	erro I/lo	0,021112038	erro I/lo	0,016449379	erro I/lo	0,014550836
espessura	1,08	espessura	2,09	espessura	3,0325	espessura	4,03	espessura	5,02
erro da espessura	0,035471147	erro da espessura	0,037116075	erro da espessura	0,035597153	erro da espessura	0,03593101	erro da espessura	0,030979031
erro I/lo corrigido	0,02493661	erro I/lo corrigido	0,039605899	erro I/lo corrigido	0,02195652	erro I/lo corrigido	0,017107354	erro I/lo corrigido	0,015132869
erro do ln/lo corrig	-0,2781718	erro do ln/lo corrig	-0,005338237	erro do ln/lo corrig	-0,023305042	erro do ln/lo corrig	-0,01362083	erro do ln/lo corrig	-0,009581429

**Fonte: O autor, 2021.**

Desta forma, após cálculos preliminares os valores e erros associados foram lançados no programa OriginPro 2018, para ajuste de curva linear, que fornece o coeficiente de atenuação para cada amostra. As curvas de ajuste estão apresentadas no Capítulo de análises de resultados.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Com o objetivo de analisar a eficiência de placas de argamassa de cimento com adição de limalha de ferro fundido na atenuação de raios X, foi necessária a análise das características dos materiais utilizados nesta pesquisa, onde foram escolhidos os materiais para caracterização física e mecânica; produzidas 16 placas com diferentes traços e materiais para análise de atenuação de raios X e; produzidos 60 corpos de prova para análise de resistência a compressão dos materiais em estudo.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO E ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS MATERIAIS

Os resultados da caracterização dos materiais são referentes aos ensaios de determinação granulométrica, massa específica, resistência à compressão e de atenuação de raios X das amostras em análise.

#### 4.1.1 Caracterização Granulométrica

Os resultados da análise granulométrica das amostras são apresentados conforme distribuição de tamanhos de partículas de cada material. Após as etapas de pesagem e peneiramento dos materiais, obteve-se os resultados a seguir.

##### 4.1.1.1 Granulometria da areia

Os dados apresentados na Tabela 4 referem-se à areia média.

**Tabela 4 - Distribuição granulométrica da areia em peneiras**

(continua)

Peneira	Peso do Material Retido (g)	Porcentagem %
0,150	60,1	12,02
0,300	212,7	42,55
0,600	92,7	18,54
1,200	19,5	3,90
2,400	29	5,80
4,800	0	0,00

(continuação)

<b>6,300</b>	0	0,00
<b>9,500</b>	0	0,00
<b>12,500</b>	0	0,00
<b>Fundo</b>	85,9	17,18
<b>Peso Total</b>	499,9	100,00

**Fonte: O autor, 2021.**

Por meio da análise da Tabela 4, observa-se que a maior concentração do material retido, possui concentração granulométrica de aproximadamente 43% da sua quantidade com tamanho inferior a 0,6mm, retida na peneira de 0,3mm.

#### 4.1.1.2 Granulometria da brita 0 (pedrisco)

Os dados apresentados na Tabela 5 referem-se à brita 0 ou pedrisco.

**Tabela 5 - Distribuição granulométrica do pedrisco em peneiras**

<b>Peneira</b>	<b>Peso do Material Retido (g)</b>	<b>Porcentagem %</b>
<b>0,150</b>	0,6	0,02
<b>0,300</b>	0,3	0,01
<b>0,600</b>	0,6	0,02
<b>1,200</b>	1	0,03
<b>2,400</b>	243,1	8,10
<b>4,800</b>	814,4	27,15
<b>6,300</b>	1661,7	55,39
<b>9,500</b>	259,1	8,64
<b>12,500</b>	11,2	0,37
<b>Fundo</b>	7,8	0,26
<b>Peso Total</b>	2999,8	100,00

**Fonte: O autor, 2021**

Por meio da análise da Tabela 5, observa-se que a maior concentração do material retido, possui concentração granulométrica de aproximadamente 55% da sua quantidade com tamanho menor que 9,5mm as quais foram retidas na peneira 6,3mm.

#### 4.1.1.3 Granulometria da limalha de ferro fundido

Os dados apresentados na Tabela 6 referem-se à limalha de ferro fundido.

**Tabela 6 - Distribuição granulométrica da limalha de ferro fundido**

Peneira	Peso do Material Retido (g)	Porcentagem %
0,150	0,1	0,02
0,300	4,9	0,98
0,600	65,1	13,02
1,200	245,5	49,11
2,400	137,1	27,43
4,800	32,6	6,52
6,300	13,5	2,70
9,500	0	0,00
12,500	0	0,00
Fundo	1,1	0,22
<b>Peso Total</b>	<b>499,9</b>	<b>100,00</b>

Fonte: O autor, 2021.

Por meio da análise da Tabela 6, observa-se que a maior concentração do material retido, possui concentração granulométrica de aproximadamente 49% da sua quantidade com tamanho menor que 2,4mm as quais foram retidas na peneira 1,2mm. Quando somados os materiais retidos nas peneiras 0,6mm; 1,2mm e 2,4mm estes utilizados na pesquisa, o material soma 89,56% do total peneirado.

#### 4.1.1.4 Granulometria da argamassa baritada

Os dados apresentados na Tabela 7 referem-se à argamassa baritada.

**Tabela 7 - Distribuição granulométrica da barita**

(continua)

Peneira	Peso do Material (g)	Porcentagem %
0,150	53,3	10,66
0,300	295,7	59,13
0,600	109,9	21,98
1,200	14,7	2,94
2,400	4,3	0,86
4,800	1,5	0,30

(continuação)		
<b>6,300</b>	0	0,00
<b>9,500</b>	0	0,00
<b>12,500</b>	0	0,00
<b>Fundo</b>	20,7	4,14
<b>Peso Total</b>	500,1	100,00

**Fonte: O autor, 2021.**

Por meio da análise da Tabela 7, observa-se que a maior concentração do material retido, possui concentração granulométrica de aproximadamente 59% da sua quantidade com tamanho menor que 0,6mm as quais foram retidas na peneira 0,3mm.

#### 4.1.1.5 Granulometria do cimento Portland

Os dados apresentados na Tabela 8 referem-se ao cimento Portland, com peso de 50g e mensurados através do analisador de partículas por difração de laser, com faixa de leitura entre 0,01 a 3500 µm e meio de suspensão líquido.

**Tabela 8 - Distribuição granulométrica do cimento Portland**

<b>Dimensão (mm)</b>	<b>Sieve Number</b>	<b>Acumulado %</b>
<b>0,0010</b>	12000	2,470
<b>0,0065</b>	2000	10,510
<b>0,0085</b>	1670	5,940
<b>0,010</b>	1250	4,160
<b>0,013</b>	1000	7,330
<b>0,018</b>	800	10,180
<b>0,020</b>	700	3,500
<b>0,023</b>	600	4,410
<b>0,028</b>	500	5,320
<b>0,032</b>	450	2,760
<b>0,038</b>	400	2,580
<b>0,125</b>	120	4,090
<b>0,150</b>	100	6,010
<b>0,180</b>	80	5,100
<b>0,212</b>	70	3,760
<b>0,250</b>	60	4,150
<b>0,300</b>	50	4,680
<b>0,355</b>	45	3,400

**Fonte: O autor, 2021.**

Por meio da análise da Tabela 8, observa-se que a maior concentração do material retido, possui concentração granulométrica de aproximadamente 21% das suas partículas entre os tamanhos de 0,018mm e 0,0065mm, representadas pelas leituras de peneiras de 2000 e 800 respectivamente.

#### 4.1.2 Caracterização da Massa Específica

Os resultados da análise de massa específica dos materiais são apresentados em ordem crescente e obtidos em ensaios conforme recomendações normativas. Os dados apresentados na Tabela 9 referem-se aos valores de massa específica dos materiais ensaiados.

**Tabela 9 - Massa específica dos materiais**

<b>Material</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Areia média</b>	2,65
<b>Brita 0 ou pedrisco</b>	2,77
<b>Cimento Portland</b>	3,03
<b>Argamassa baritada</b>	3,58
<b>Limalha de ferro fundido</b>	7,22
<b>Chumbo</b>	12,86

**Fonte: O autor, 2021.**

Com relação à massa específica dos materiais, a limalha de ferro fundido apresentou valor superior a maioria dos materiais utilizados nas barreiras radiológicas, ficando com densidade inferior apenas a do chumbo. Quando comparado o valor de massa específica da limalha de ferro fundido com os materiais comumente utilizados nas barreiras radiológicas, a limalha de ferro possui valor de aproximadamente 101,6% maior do que a argamassa baritada e 43,8% menor do que o chumbo.

#### 4.1.3 Caracterização da Resistência à Compressão

Os resultados da análise de resistência à compressão dos materiais são apresentados na Tabela 10 e em gráfico na Figura 18. Para o ensaio foram



produzidos 60 corpos de prova, com quatro corpos de prova para cada traço, exceto o chumbo. Os corpos de prova foram rompidos aos 28 dias, em uma prensa hidráulica universal com capacidade de 30.000 kgf de trabalho, e velocidade de carregamento equivalente a 0,25 MPa/s.

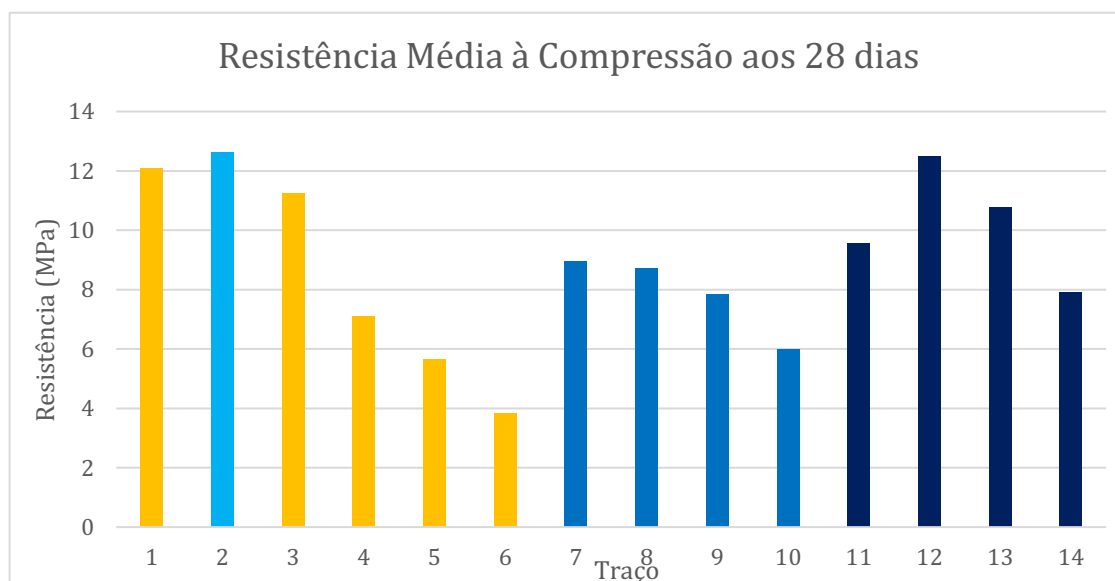
**Tabela 10 - Placas intituladas de acordo com os traços e características gerais**

Identificação		Amostra	Resistência à compressão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Traço	1	Concreto	12,07	26,36
Traço	2	Argamassa Comum	12,64	8,585
Traço	3	Limalha 0,6	11,24	4,5
Traço	4	Limalha 0,6	7,087	14,03
Traço	5	Limalha 0,6	5,649	4,524
Traço	6	Limalha 0,6	3,833	5,435
Traço	7	Limalha 1,2	8,956	5,973
Traço	8	Limalha 1,2	8,702	19,66
Traço	9	Limalha 1,2	7,83	11,35
Traço	10	Limalha 1,2	6,003	6,529
Traço	11	Limalha 2,4	9,567	19,41
Traço	12	Limalha 2,4	12,49	11,95
Traço	13	Limalha 2,4	10,76	11,28
Traço	14	Limalha 2,4	7,904	7,717

**Fonte: O autor, 2021.**

Os ensaios foram realizados em 56 corpos de prova, conforme identificados na Tabela 10, não sendo possível o ensaio nos corpos de prova de argamassa baritada devido a impossibilidade de desforma do material: o mesmo colapsou no momento da desforma e no material chumbo devido a especificação (fita) do material. Para tanto, estão demonstradas na Tabela 10 os demais traços, bem como a denominação das amostras e duas respectivas resistências a compressão.

**Figura 18 - Resistência média à compressão para cada composição**



**Fonte: O autor, 2021.**

Ao analisar os valores médios das resistências à compressão dos conjuntos de traços, nota-se um decréscimo relevante na resistência do corpo de prova à compressão, em comparação com os corpos de prova de referência de concreto e argamassa comum (traços 1 e 2) respectivamente. À medida em que se aumenta a quantidade de limalha com tamanho de 0,6mm nos primeiros traços (traços 3, 4, 5 e 6), sua resistência é decrescente, porém em menor proporção nos traços que compõe limalha de 1,2mm e 2,4mm (7, 8, 9 e 10; e 11, 12, 13 e 14, respectivamente).

Notam-se as maiores resistências à compressão em traços com baixo teor de adição de limalha, onde a porcentagem de areia é maior.

#### 4.1.4 Caracterização da Atenuação de Raios X dos Materiais

A caracterização da atenuação avalia o desempenho dos materiais quando a capacidade de absorção dos materiais as energias de raios X. Para determinação dos valores dos coeficientes de atenuação de cada material, as amostras foram submetidas a ensaios de laboratório já mencionados, onde os mesmos receberam quatro diferentes intensidades de energias de radiação, sendo 70 keV, 90 keV, 125

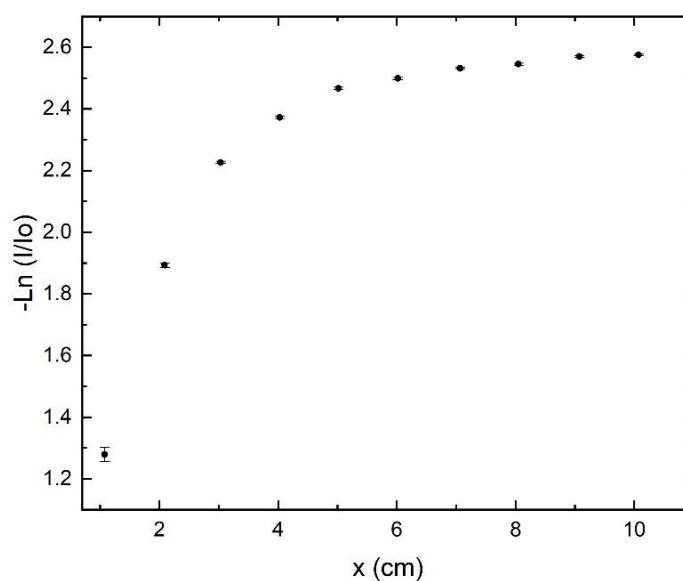
keV e 160 keV, sendo necessário apenas alterar a intensidade da energia no material chumbo o qual chegou a receber 200 keV.

A partir do ensaio de raio X e geração imagens foi possível a coleta e determinação dos valores de absorção. Os resultados da análise de atenuação linear dos materiais são apresentados na Tabela 11.

Os cálculos do coeficiente de atenuação levaram em conta os erros associados às dimensões de espessuras dos degraus das placas (amostras), tanto erros sistemáticos quanto aleatórios, os erros associados às medições de tons de cinza (atenuação). Os erros foram propagados e estão apresentados com certeza (faixa) de 68%.

Para análise dos dados, foram utilizados os ajustes apenas com os primeiros 5cm das placas cimentícias. Isto se justifica pelo comportamento e análise de todo conjunto de dados. Na Figura 19, constam os valores de intensidade relativa (já linearizados) de dez pontos (degraus) do material concreto. A Figura 19 é um exemplo de que, mesmo após a linearização, ainda há um comportamento não linear em relação à intensidade relativa após os 4 ou 5 pontos iniciais. Isto se explica pelo fato de que o material, a partir destas espessuras, atenua por completo os raios X.

**Figura 19 - Atenuação em função da espessura do concreto (70 keV)**

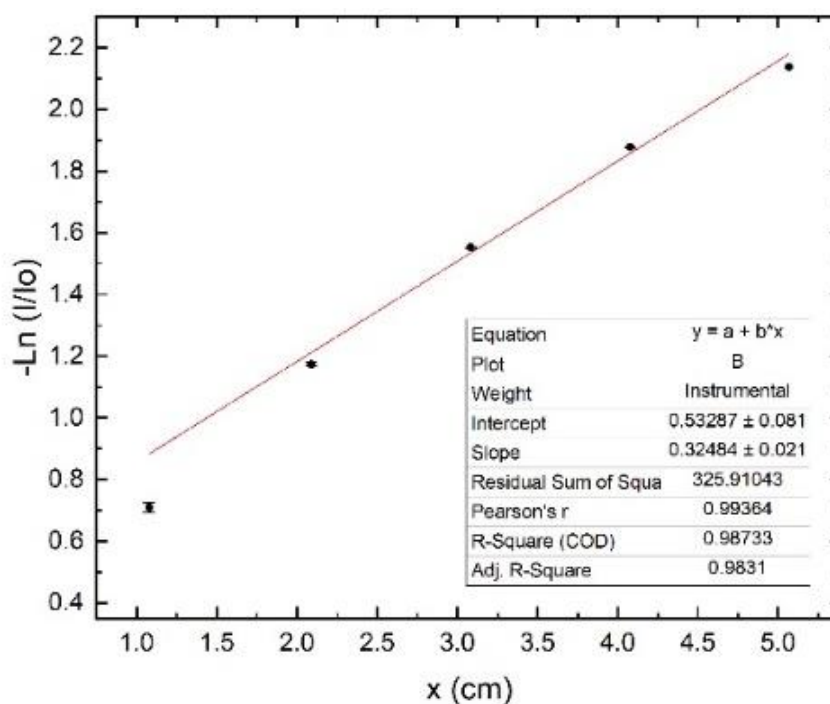


**Fonte: O autor, 2021.**

Ao analisar os valores do  $\ln$  da intensidade relativa observa-se que, a partir do ponto número 5, a energia é praticamente toda absorvida pelo material. Desta maneira, fica claro que a análise deve ser restrita.

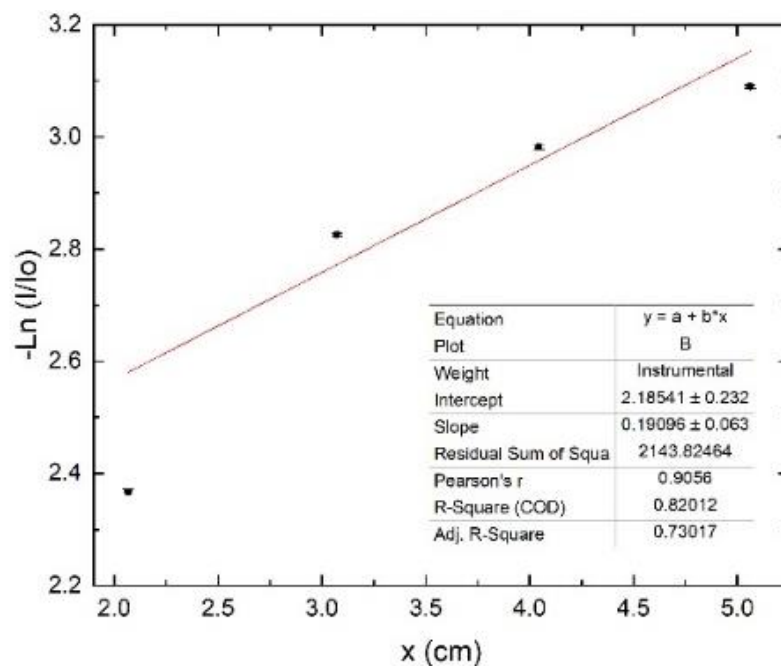
Desta forma, os materiais foram analisados levando em consideração apenas cinco pontos de intensidade relativa, garantindo assim certa linearidade esperada para a grandeza. Nas Figuras 20 a 22 estão exemplificados os gráficos gerados pelos ajustes das retas, parte do Apêndice A, de acordo com o material e as energias de raios X no experimento.

**Figura 20 - Atenuação nos pontos iniciais para argamassa comum (125 keV)**



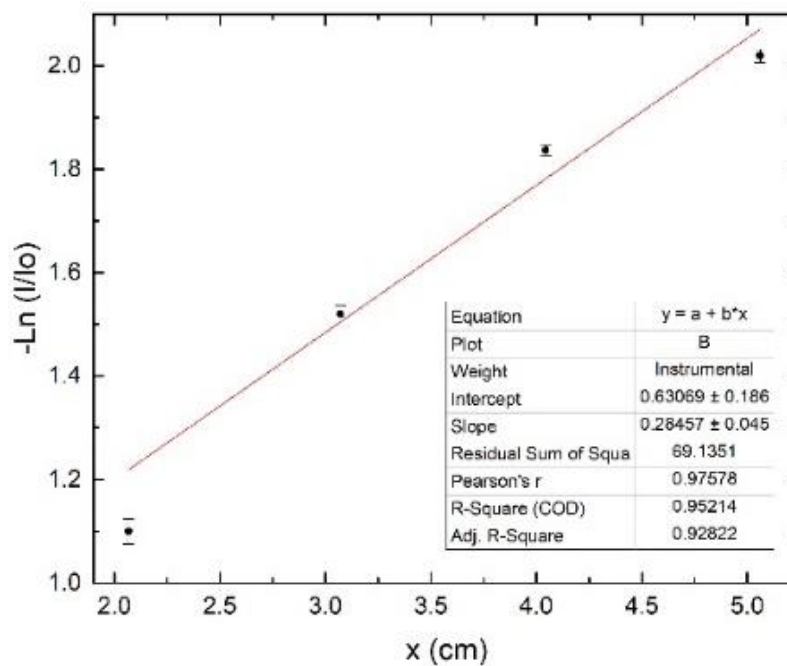
**Fonte: O autor, 2021.**

Figura 21 - Atenuação nos pontos iniciais para argamassa baritada (125 keV)



Fonte: O autor, 2021.

Figura 22 - Atenuação nos pontos iniciais para argamassa baritada (160 keV)



Fonte: O autor, 2021.

O coeficiente de atenuação é a declividade das retas ajustadas (*slope*). Nos casos das Figuras 20 a 22, os valores aparecem na legenda, com valores de  $0,325 \pm 0,021$ ,  $0,191 \pm 0,063$  e  $0,285 \pm 0,045$ . Os coeficientes de atenuação para cada material e energia utilizados constam do Apêndice A.

Os valores da Tabela 11 são referentes aos coeficientes de atenuação e erros associados obtidos da análise dos ajustes das retas.

**Tabela 11 – Valores de coeficiente de atenuação linear dos materiais**

Identificação		Amostra	Coeficiente de Atenuação Linear (cm <sup>-1</sup> ) Energia 70 keV	Coeficiente de Atenuação Linear (cm <sup>-1</sup> ) Energia 90 keV	Coeficiente de Atenuação Linear (cm <sup>-1</sup> ) Energia 125 keV	Coeficiente de Atenuação Linear (cm <sup>-1</sup> ) Energia 160 keV
Traço	1	Concreto	0,174±0,042	0,284±0,024	0,312±0,025	0,330±0,010
Traço	2	Argamassa Comum	0,242±0,046	0,295±0,027	0,325±0,021	0,308±0,009
Traço	3	Argamassa Baritada	0,0117±0,0024	0,097±0,039	0,191±0,063	0,285±0,045
Traço	4	Chumbo	-	-	-	0,74±0,59
Traço	5	Limalha 0,6	0,123±0,027	0,234±0,026	0,317±0,022	0,317±0,015
Traço	6	Limalha 0,6	0,080±0,029	0,189±0,036	0,288±0,039	0,297±0,033
Traço	7	Limalha 0,6	0,024±0,017	0,081±0,029	0,206±0,030	0,238±0,038
Traço	8	Limalha 0,6	0,028±0,026	0,125±0,038	0,244±0,056	0,277±0,026
Traço	9	Limalha 1,2	0,135±0,034	0,242±0,033	0,307±0,038	0,317±0,020
Traço	10	Limalha 1,2	0,058±0,029	0,198±0,032	0,312±0,020	0,337±0,010
Traço	11	Limalha 1,2	0,056±0,034	0,160±0,038	0,272±0,038	0,333±0,013
Traço	12	Limalha 1,2	0,035±0,027	0,124±0,030	0,2581±0,027	0,267±0,039
Traço	13	Limalha 2,4	0,155±0,041	0,239±0,031	0,297±0,025	0,300±0,014
Traço	14	Limalha 2,4	0,094±0,031	0,210±0,033	0,300±0,031	0,312±0,023
Traço	15	Limalha 2,4	0,072±0,029	0,173±0,032	0,2908±0,0268	0,314±0,018
Traço	16	Limalha 2,4	0,454±0,024	0,250±0,021	0,243±0,054	0,268±0,016

**Fonte: O autor, 2021.**

A partir da análise da Tabela 11, referente aos valores de coeficiente de atenuação linear dos materiais, verifica-se que os valores mais próximos a literatura estão enquadrados na energia de 160 keV (Andreucci, 2016 – Concreto com aplicação de energia de 150 keV e coeficiente de atenuação de 0,327 (cm<sup>-1</sup>)). Acredita-se que os valores dos coeficientes de atenuação para energias inferiores possam estar com

alterações, pois os materiais podem ter atenuado toda a energia, mesmo com espessuras inferiores a 5cm.

Em análise aos valores da Tabela 11, para a energia de 70 keV em relação aos materiais concreto e argamassa baritada o coeficiente de atenuação linear é  $0,174\pm 0,042$  e  $0,0117\pm 0,0024$  respectivamente, e dentre as amostras de limalha de ferro fundido que ficou mais próximo a estes valores foi o Traço 13 com  $0,155\pm 0,041$ , a qual possui 2,5 partes de areia e 0,5 de limalha de 2,4mm e, o Traço 16 com  $0,454\pm 0,024$  a qual possui 1,0 parte de areia e 2,0 de limalha de 2,4mm, esta última possuindo valor de atenuação linear superior aos demais materiais citados.

Para a energia de 90 keV em relação aos materiais concreto e argamassa baritada o coeficiente de atenuação linear é  $0,284\pm 0,024$  e  $0,097\pm 0,039$  respectivamente, e dentre as amostras de limalha de ferro fundido que ficou mais próximo a estes valores foi o Traço 16 com  $0,250\pm 0,021$ , a qual possui 1,0 parte de areia e 2,0 de limalha de 2,4mm.

Para a energia de 125 keV em relação aos materiais concreto e argamassa baritada o coeficiente de atenuação linear é  $0,312\pm 0,025$  e  $0,191\pm 0,063$  respectivamente, e dentre as amostras de limalha de ferro fundido que ficou mais próximo a estes valores foi o Traço 05 com  $0,317\pm 0,022$ , a qual possui 2,5 partes de areia e 0,5 de limalha de 0,6mm, está ficando com o coeficiente de atenuação superior ao do material concreto, e o Traço 10 com  $0,312\pm 0,020$  a qual possui 2,0 partes de areia e 1,0 de limalha de 1,2mm.

Para a energia de 160 keV em relação aos materiais concreto, argamassa baritada e chumbo o coeficiente de atenuação linear é  $0,330\pm 0,010$ ;  $0,285\pm 0,045$  e  $0,74\pm 0,59$  respectivamente, e dentre as amostras de limalha de ferro fundido que ficou mais próximo a estes valores foi o Traço 05 com  $0,317\pm 0,015$ , a qual possui 2,5 partes de areia e 0,5 de limalha de 0,6mm, tem o coeficiente de atenuação superior ao do material argamassa baritada; e o Traço 09 com  $0,317\pm 0,020$  a qual possui 2,5 partes de areia e 0,5 de limalha de 1,2mm, tem o valor superior a argamassa baritada; Traço 10 com  $0,337\pm 0,010$  a qual possui 2,0 partes de areia e 1,0 de limalha de 1,2mm, tem o valor superior a argamassa baritada e ao concreto; Traço 11 com  $0,333\pm 0,013$  a qual possui 1,5 partes de areia e 1,5 de limalha de 1,2mm, tem o valor superior a argamassa baritada e ao concreto.

Percebe-se que ao analisar os valores dos coeficientes de atenuação linear dos materiais, as amostras de limalha de ferro fundido se comportam quase que da mesma forma que as amostras de concreto, ficando as amostras de limalha de ferro com coeficientes de atenuação inferiores nas energias de 70 e 90 keV. Porém quando se tem um aumento da energia e é possível verificar com mais clareza de absorção das amostras, o material com limalhas de ferro de 1,2mm mostram, na maior parte das análises, coeficientes de atenuação superiores aos dos materiais de argamassa baritada e concreto, os quais atualmente são mais utilizados como barreiras radiológicas.



## 5 CONCLUSÕES

A análise da eficiência de placas de argamassa de cimento com adição de limalha de ferro fundido na atenuação de raios X mostrou que a limalha de ferro, em substituição da areia nas placas cimentícias, tem coeficiente de atenuação próximos ao do concreto, para energias mais baixas, entre 70 e 90 keV. Em energias superiores a 125 keV, a limalha de ferro apresenta resultados superiores aos outros materiais (concreto e argamassa baritada).

Analisando os dados extraídos quanto as características do material de interesse nesta pesquisa, verificou-se que quanto a granulometria da limalha de ferro fundido utilizado, aproximadamente 89,56% do material peneirado, foram classificados entre as peneiras 0,6 a 2,4mm, estas utilizadas na fabricação das amostras.

Quanto à resistência a compressão das amostras de limalha de ferro fundido observou-se que os traços da limalha 0,6mm e limalha 1,2mm obtiveram maior resistência com o traço onde havia menor concentração de limalha e maior de areia, ficando estas com 11,24 e 8,96 MPa respectivamente, já para a limalha 2,4mm, o melhor resultado foi o segundo traço, chegando a 12,49 MPa, aproximando-se das resistências das amostras de concreto e argamassa de cimento.

Com relação a massa específica dos materiais, a limalha de ferro fundido apresentou valor superior a maioria dos materiais utilizados nas barreiras radiológicas, ficando com densidade inferior apenas a do chumbo. A areia apresentou massa específica de 2,65 g/cm<sup>3</sup>; a brita 0 (pedrisco), apresentou uma massa específica de 2,77 g/cm<sup>3</sup>; o Cimento Portland CII F, massa específica de 3,03 g/cm<sup>3</sup>; a barita apresentou massa específica de 3,58 g/cm<sup>3</sup>; a limalha de ferro, massa específica de 7,22 g/cm<sup>3</sup>; e o chumbo, apresentou massa específica de 12,86 g/cm<sup>3</sup>.

Foram desenvolvidas placas cimentícias atenuantes para a radiação X com limalha de ferro em substituição à areia nos traços definidos para a pesquisa, observando que há uma necessidade de construção de curva granulométrica se o interesse for aumentar a resistência à compressão das placas. Todavia, em termos de proteção radiológica, as propriedades atenuantes da placa com a limalha foram observadas.

As placas preparadas com os materiais tradicionais serviram como base para comparações. A limalha de ferro se mostrou eficiente, principalmente quando ensaiada em maiores energias, quando comparadas na energia de 160 keV e o material concreto, alguns traços com adição de ferro fundido superam os 2% de eficiência, e quando comparadas com a argamassa baritada ficam superiores a 18%.

Sugere-se para estudos e trabalhos futuros a análise da eficiência de atenuação dos materiais estudados nesta pesquisa com espessuras intermediárias (menores) principalmente a argamassa baritada e o chumbo; Analisar a eficiência de atenuação das amostras em energias de radiação diferentes (podendo ser maiores e menores); Estudar a granulometria e a melhor interação entre os materiais (intertravamento) e; Estudar outras características físicas, químicas e mecânicas dos materiais.

## REFERÊNCIAS

- ABCP. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **A versatilidade do cimento brasileiro**. São Paulo, 2018.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215 Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.
- ALMEIDA JUNIOR, A. T.; ANTONIO FILHO, J. **Caracterização da barita e do vidro cristal como atenuadores na blindagem das radiações X e Gama**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, p.53, 2005.
- ALMEIDA, P. **Projeto estrutural de uma construção enterrada tipo bunker, destinada a instalação de equipamento acelerador linear de elétrons**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, p.75, 2018.
- ANDREUCCI, R. **Proteção Radiológica – Aspectos Industriais**. Abendi, São Paulo, p.127, 2016.
- ARRUDA, W. O., **Wilhelm Conrad Röntgen: 100 anos da descoberta do raios X**. Arq Neuropsiquiatr, vol.54, n.3, p.525-531, 1996.
- ASTM B923-02. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Método de Teste Padrão para Densidade Esquelética de Pó de Metal por Hélio ou Picnometria de Nitrogênio**, ASTM International, West Conshohocken, PA, p.3, 2002.
- BARROS, F. S. **Utilização de resíduo de chumbo em forma de pó em compósitos poliméricos e como revestimento em superfícies metálicas para serem aplicados em instalações radiológicas**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, 2009.
- CICHINELL, G. **Parede ou Vedação**. Revista TECHNE, São Paulo: PINI, ano 15. nº 128, p. 52-57, 2007.
- CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes básicas de proteção radiológica, norma CNEN NN 3.01**. Rio de Janeiro, 2014.
- CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Rio de Janeiro, 10ª revisão, 2014.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR: **Diretrizes básicas de radioproteção**. CNEN/NE - 3.01, 1988.

CONAMA, Resolução nº313, de 29 de outubro de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA; Dispõe sobre o inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais; publicada no Diário Oficial da União em 22/11/2002; Brasília, DF.

CONNOR, N. **O que é atenuação de raios X – Definição**. Radiation Dosimetry. p. 1, 2020.

COSTA, P. R. **Modelo para determinação de espessuras de barreiras protetoras em salas para radiologia diagnóstica**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, p.135, 1999.

COSTA, P. R. **Física das Radiações 1**. Radiação, Instituto de Física da USP, IFUSP, 2017.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, p. 345-379, 2005.

DOUGLAS, J. S. **General solution to the shielding of medical X and ray by the NCRP report 49 methods Health Physics**, New York, v. 52, n.4, p. 431 - 436, 1987.

FIOCRUZ. Fundação Oswaldo Cruz. **Radiação**, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em:< [http://www.fiocruz.br/biosseguranca/Bis/lab\\_virtual/radiacao.html](http://www.fiocruz.br/biosseguranca/Bis/lab_virtual/radiacao.html)> Acesso em: 06 out. 2018.

FONSECA, G. C. da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil [manuscrito]: uma abordagem epistêmica**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, p. 105, 2010.

FRANCO, L. S. **Emprego de telas metálicas soldadas em alvenarias de vedação**. USP, 2008. *apud* SPECK, Jaison Araujo. **Análise do desempenho de placas cimentícias através da adição de fibras e telas, visando a redução de deformação de deformações térmicas e patológicas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de mestrado. Porto Alegre, p.111, 2014.

FREITAS, J. A.; COSTA M. R. M. M.; ARTIGAS L. V. **Materiais de Construção, TECNOLOGIAS EM CONCRETO**, Ministério da Educação, Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Departamento de Construção Civil, 2018.

GODOI, W. C. **Deteção de defeitos em isoladores poliméricos por radiografia digital**. Universidade Federal do Paraná, Dissertação de mestrado. Curitiba, Paraná, p. 68, 2005.

Grupo GRX São Paulo, acesso em 28/07/2020. <https://www.grxsp.com.br/projetos-realizados-em-instituicoes-diversas/projeto-realizado-no-jockey-club-de-sao-paulo.html>

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP. **The 2007 Recommendations of the International Commission Radiological Protection**. Ann ICRP. 2007. (ICRP publication 103)

\_\_\_\_\_, ICRP publication 26 **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Publicação 26, p.205, 1977.

JACOMINO, V. M. F. *et al.* **Controle Ambiental das Indústrias de Ferro-Gusa em Altos Fornos a Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, p. 181-197; 2002.

LUCAS, D; BENATTI, C. T. **Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil**. Revista em Agronegócios e Meio Ambiente, v. 1, n.3, p. 405-418, 2008.

Mapa da Obra, acesso em: 02/10/2020.  
<https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/blindagens-de-concreto-pesado/>

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Estrutura, propriedades e materiais**. 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Revisores e Coordenadores. Nicole Pagan Hasparyk, Paulo Helene & Vladimir Antonio Paulon. São Paulo: IBRACON, 2008.

MS. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 3.535, de 02 de setembro de 1998**. República Federativa do Brasil, Brasília (DF), Gabinete do Ministro, 1998.

MS. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Resolução Da Diretoria Colegiada - RDC Nº 330**, República Federativa do Brasil, Brasília (DF), 20 de dezembro de 2019.

MS. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Chumbo**. República Federativa do Brasil, Brasília (DF); 2017. Acesso em 27 de março de 2020, em: (<https://www.saude.gov.br/vigilancia-em-saude/vigilancia-ambiental/vigipeq/contaminantes-quimicos/chumbo>)

MTE. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR 15 - Atividades e Operações Insalubres - Radiações Ionizantes**. Anexo 5. Atualizado pela Portaria MTb n.º 1.084, de 18 de dezembro de 2018. República Federativa do Brasil, Brasília (DF); 2018.

MTE. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR 32 - Segurança e Saúde no Trabalho em Serviços de Saúde**. Portaria GM n.º 1.748, de 30 de agosto de 2011. República Federativa do Brasil, Brasília (DF); 2011.

NCRP. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, Report N°49 – **Structural Shielding Design and Evolution for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV**. Scientific Committe, 1976. Acesso em 30 de agosto de 2019, em: (<https://ncrponline.org>)

NCRP. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, Report N°147 – **Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities**. Scientific Committee, p.184, 2004. Acesso em 30 de agosto de 2019, em: (<https://ncrponline.org>)

NEVILLE, A. M. BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto** / tradução: Ruy Alberto Cremonini. – 2ª ed. – Porto Alegre: Brokman, 2013.

OURIDES, S. F. **Breve Histórico dos cem anos da descoberta dos raios X: 1895-1995**. Instituto de Química da Universidade de São Paulo, USP. Química Nova, São Paulo, p.574-583, 1995.

PAES DE ANDRADE, M. M. F. **Avaliação da influência do tamanho do campo de radiação na determinação da camada semi-redutora pela simulação Monte Carlo PENLOPE**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, RECIFE, p.69, 2012.

PEREIRA, W. S., KELECOM A., PEREIRA, J. R. S. **Comparação entre a norma brasileira de radioproteção e a recomendação da International Commission on Radiological Protection publicadas em 2007**. Brazilian Journal of Radiation Sciences, p. 10, 2015.

PETRUCCI, E.G.R. **Concretos especiais**. In: **Concreto de cimento Portland**. p.226-296, 1981.

PINO, E.S., GIOVEDI, C. **Radiação ionizante e suas aplicações na indústria**. Revista UNILUS Ensino e Pesquisa, n.2, v.2, p. 47, 2005.

POLIVKA, M., DAVIS, H.S. **ASTM STP 169B**, Chap. 26, p. 420-434, 1979.

ROCHA, J.C. **Coletânea Habitare - vol. 4 - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Porto Alegre, ANTAC, p.272, 2003.

SALVAJOLI, J. V., SOUHAMI, L., FARIA, S. L. **Radioterapia em oncologia**. Rio de Janeiro, Editora Atheneu: p.1312, 2013.

SANTOS, J. C. **Estudo experimental das relações entre o Kerma no ar e equivalente de dose ambiente para o cálculo de barreiras primárias em salas radiológicas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Instituto de Física. Departamento de Física Nuclear. São Paulo, p.111, 2013.

SERBINO, E. M. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. P. 122, 2005.

SOUZA, J. G. M. **Argamassa baritada: teste da proporção e da espessura do revestimento, para uso como barreira de proteção para raios X de 30kev de**

**energia efetiva, em clínicas odontológicas.** Universidade de Estadual de Campinas - UNICAMP, Piracicaba – SP, 1992.

SPECK, J. A. **Análise do desempenho de placas cimentícias através da adição de fibras e telas, visando a redução de deformação de deformações térmicas e patológicas.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de mestrado. Porto Alegre, p.111, 2014.

TAMAKI, L. **Salas blindadas.** Revista Técnica. Edição 176 – Novembro, 2011.

TAUHATA, L., SALATI, I., DI PRINZIO, R., ANTONIETA, R. D. P. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos** - 9ª revisão - Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Rio de Janeiro. p. 345, 2013.

TEIXEIRA, J. A. A. B, SILVA, B. C. E. **Chumbo.** p. 198-215, 2009.

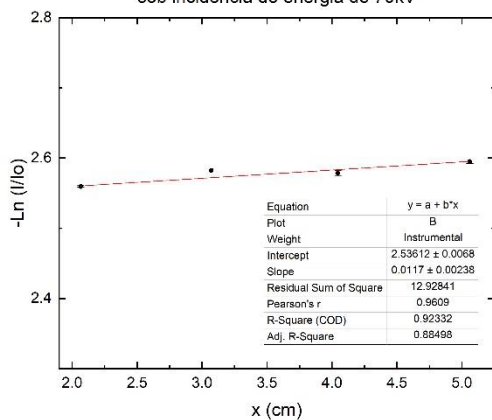
VARGAS, Vanessa C. de. **Concreto Leve: estudo de dosagem substituindo o agregado graúdo convencional pela argila expandida.** Curso de Engenharia Civil (Graduação). Universidade Alto do Rio do Peixe – UNIARP. Caçador, p.80, 2018.

Venetto Ingenieria, acesso em 28/07/2020. <https://venettoingenieria.cl/wp/proteccion-radiologica/>

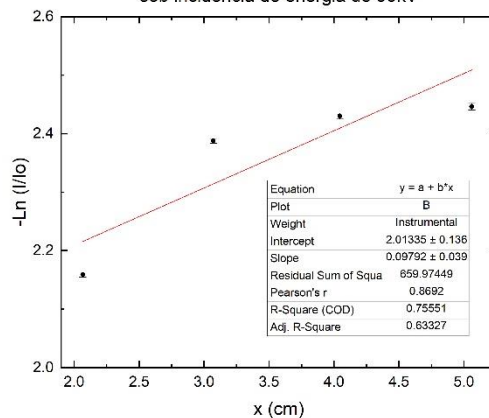
## APÊNDICE A

### Gráficos de Curva de Atenuação – Programa OriginPro

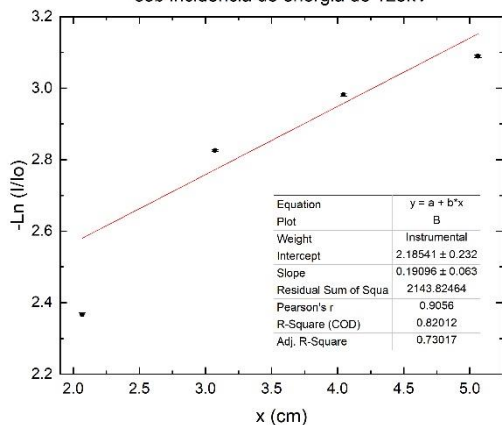
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa baritada sob incidência de energia de 70kV



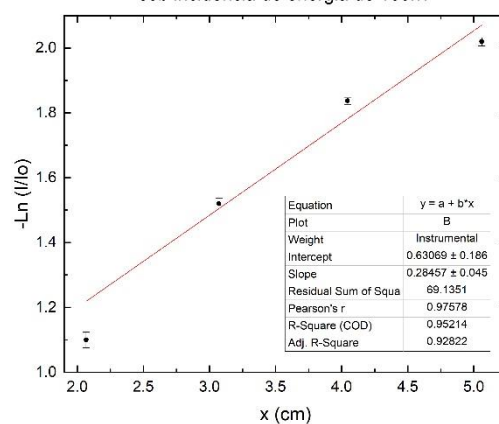
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa baritada sob incidência de energia de 90kV



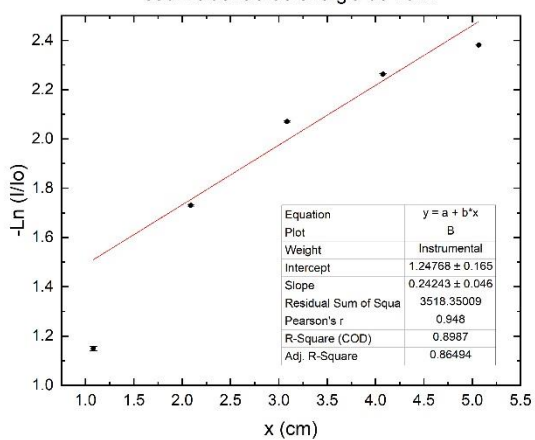
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa baritada sob incidência de energia de 125kV



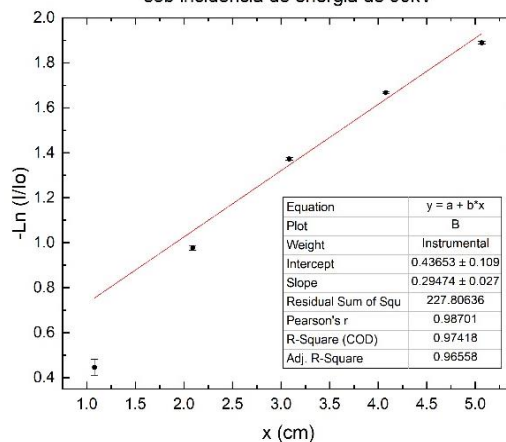
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa baritada sob incidência de energia de 160kV



Intensidade relativa em função da espessura da argamassa comum sob incidência de energia de 70kV

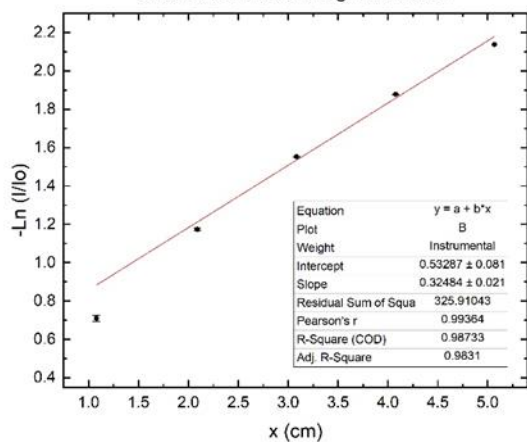


Intensidade relativa em função da espessura da argamassa comum sob incidência de energia de 90kV

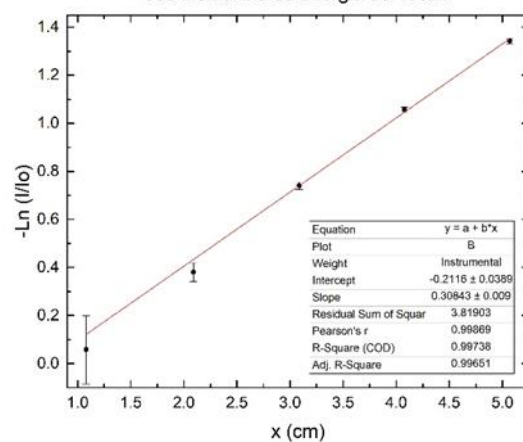




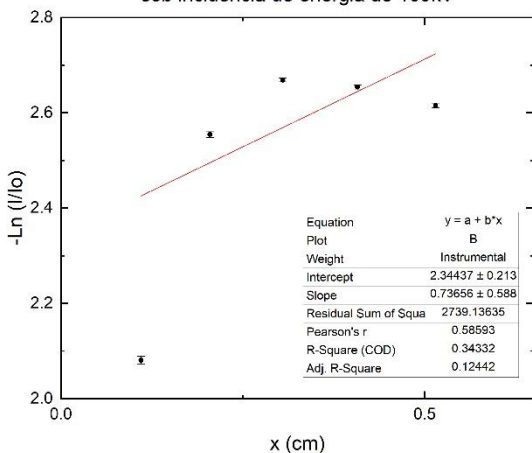
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa comum sob incidência de energia de 125kV



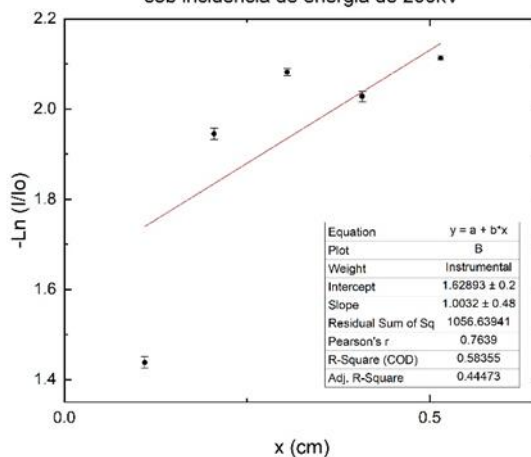
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa comum sob incidência de energia de 160kV



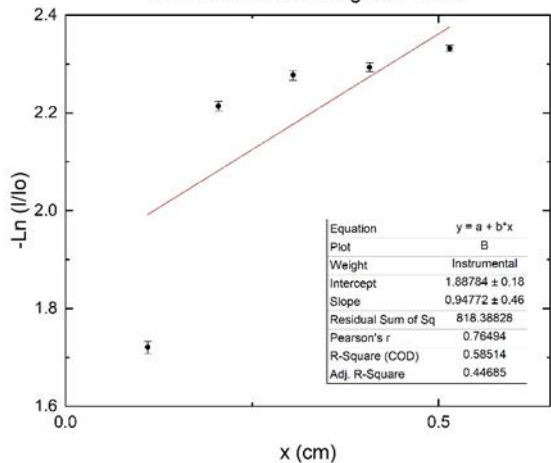
Intensidade relativa em função da espessura da chumbo sob incidência de energia de 160kV



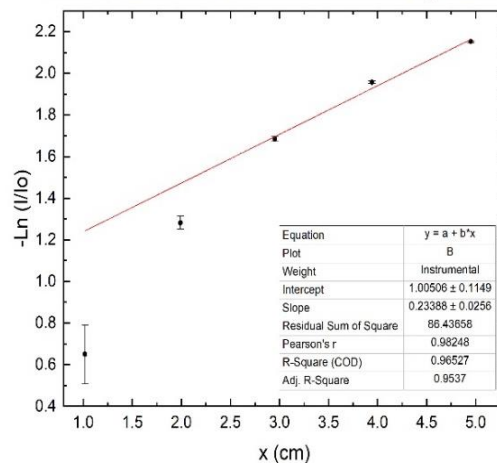
Intensidade relativa em função da espessura da chumbo sob incidência de energia de 200kV



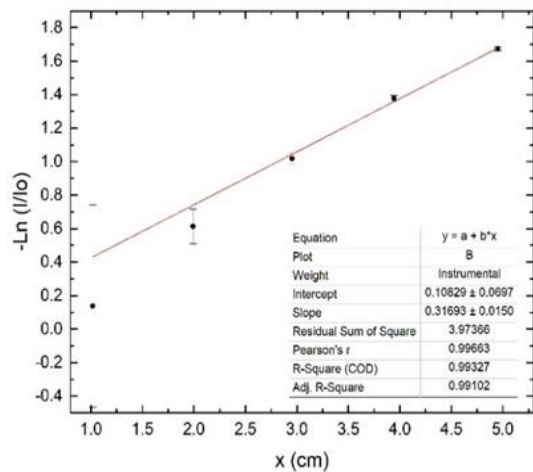
Intensidade relativa em função da espessura da chumbo sob incidência de energia de 188kV



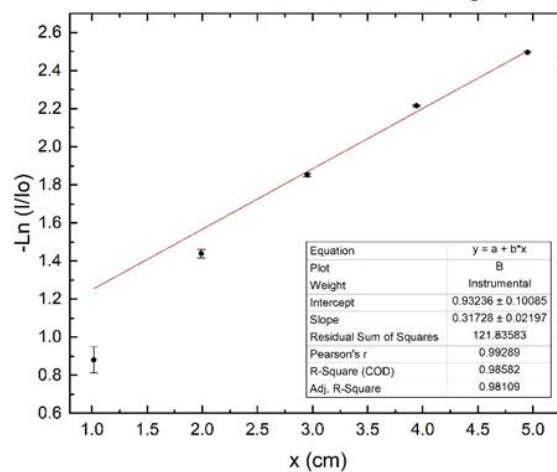
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T1 sob incidência de energia de 90kV



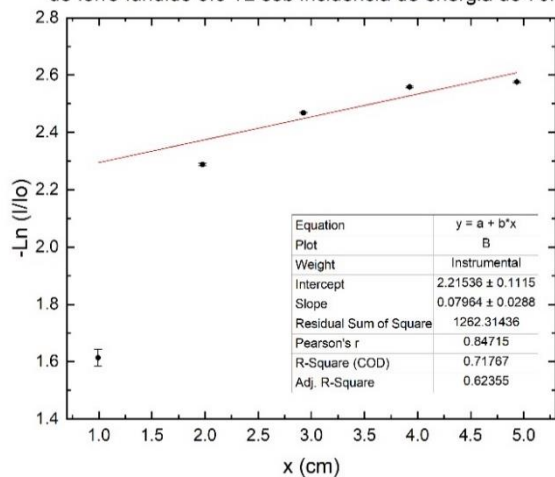
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T1 sob incidência de energia de 160kV



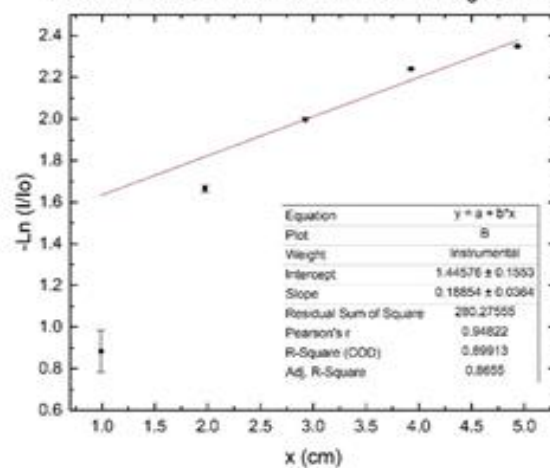
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T1 sob incidência de energia de 125kV



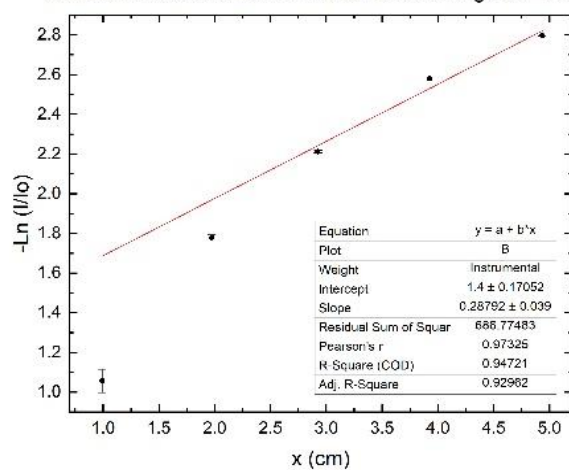
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T2 sob incidência de energia de 70kV



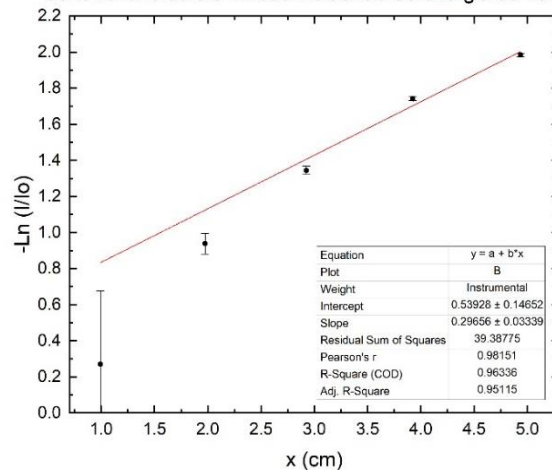
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T2 sob incidência de energia de 90kV



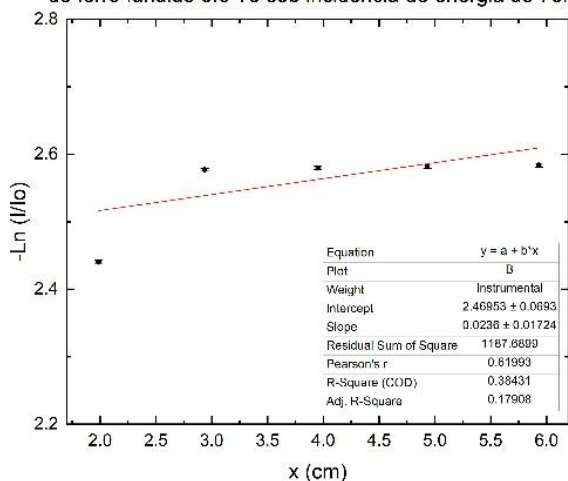
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T2 sob incidência de energia de 125kV



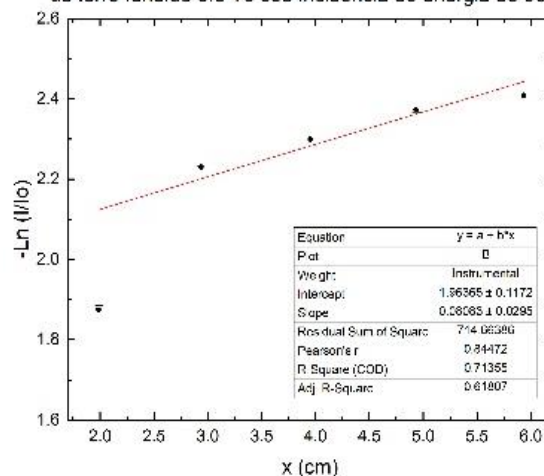
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T2 sob incidência de energia de 160kV



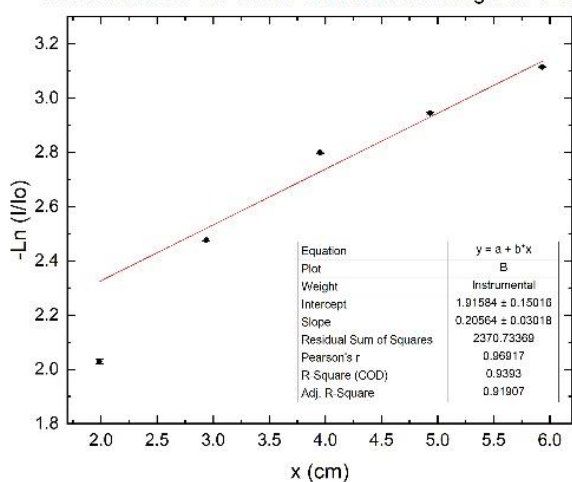
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T3 sob incidência de energia de 70kV



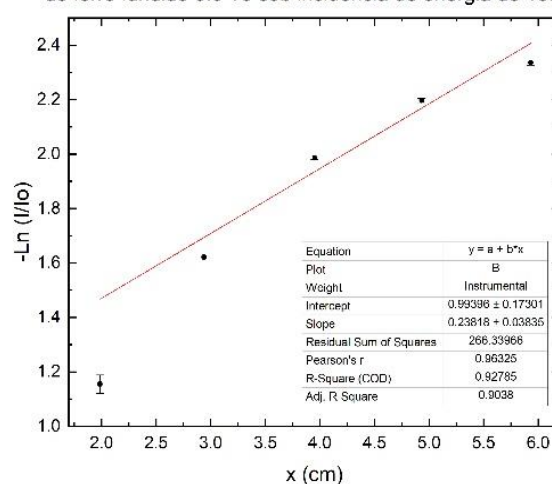
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T3 sob incidência de energia de 90kV



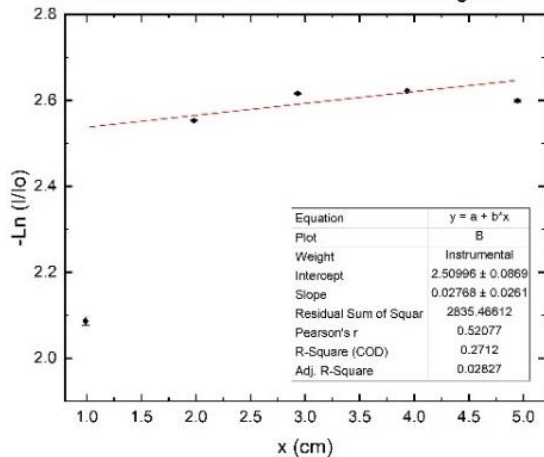
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T3 sob incidência de energia de 125kV



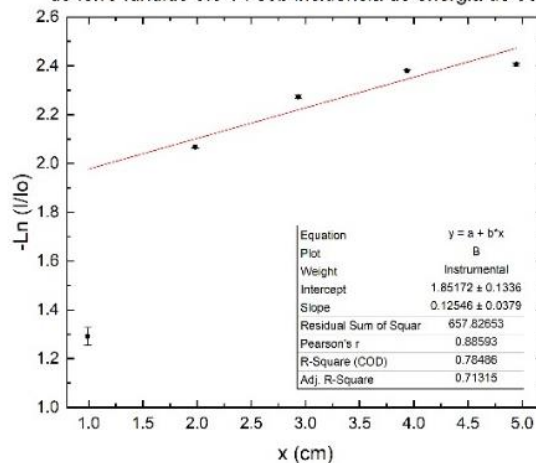
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T3 sob incidência de energia de 160kV



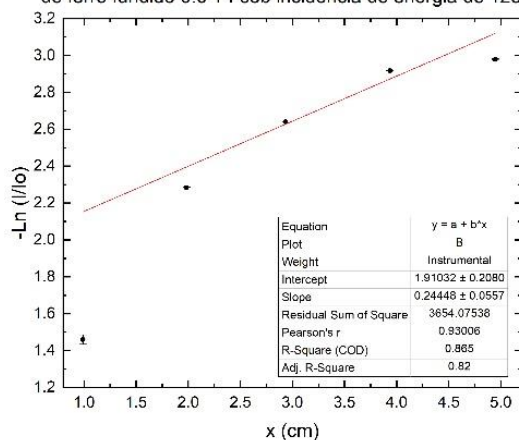
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T4 sob incidência de energia de 70kV



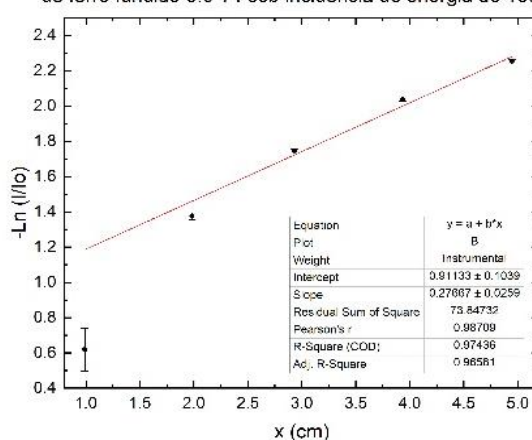
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T4 sob incidência de energia de 90kV



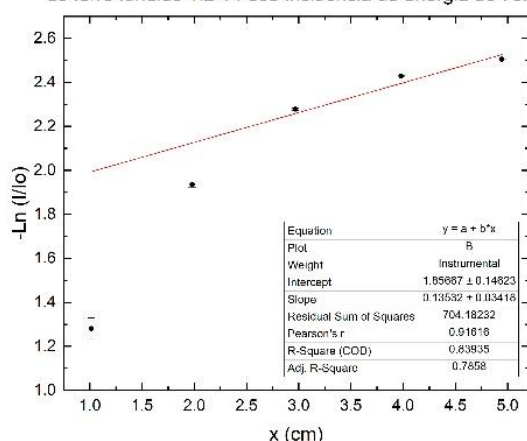
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T4 sob incidência de energia de 125kV



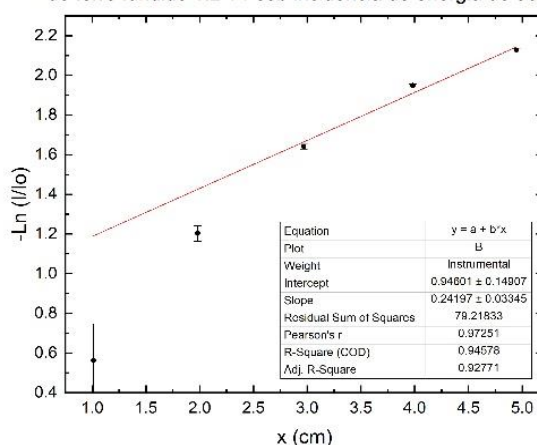
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 0.6 T4 sob incidência de energia de 160kV



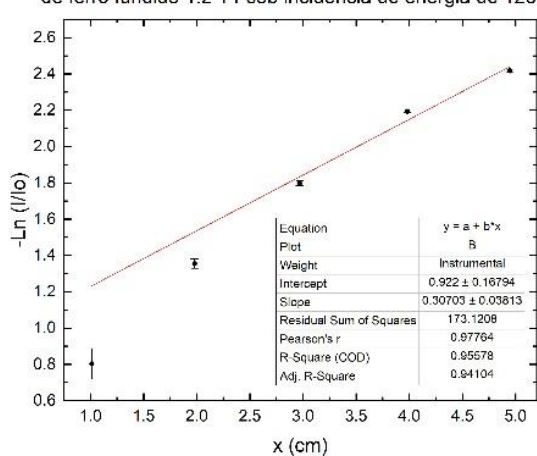
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T1 sob incidência de energia de 70kV



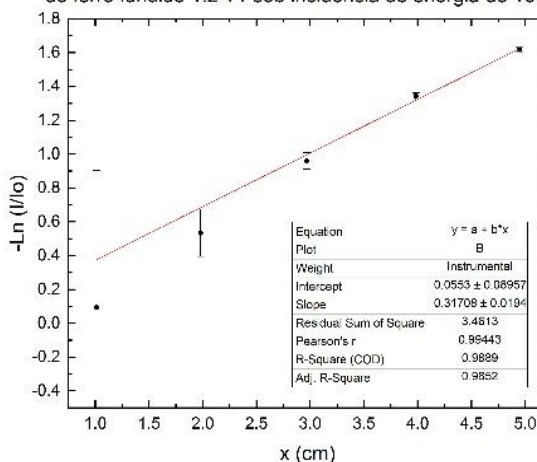
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T1 sob incidência de energia de 90kV



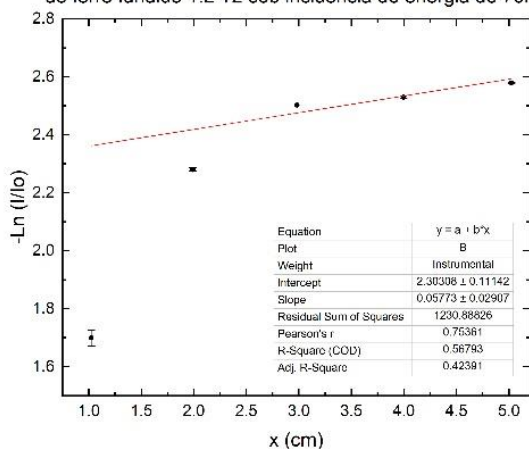
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T1 sob incidência de energia de 125kV



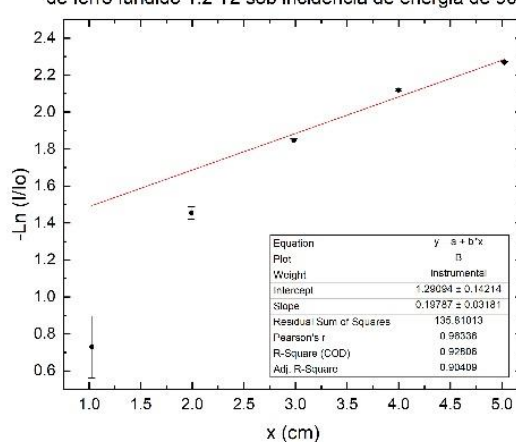
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T1 sob incidência de energia de 160kV



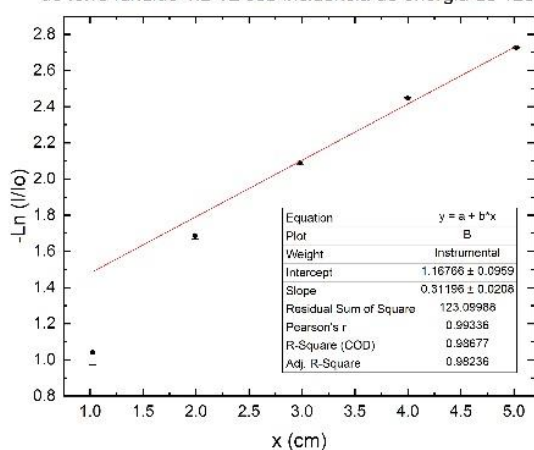
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T2 sob incidência de energia de 70kV



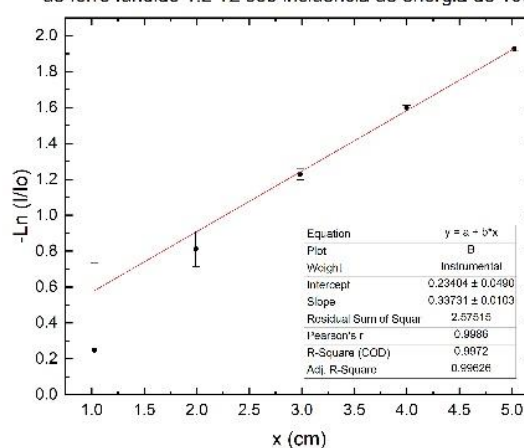
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T2 sob incidência de energia de 90kV



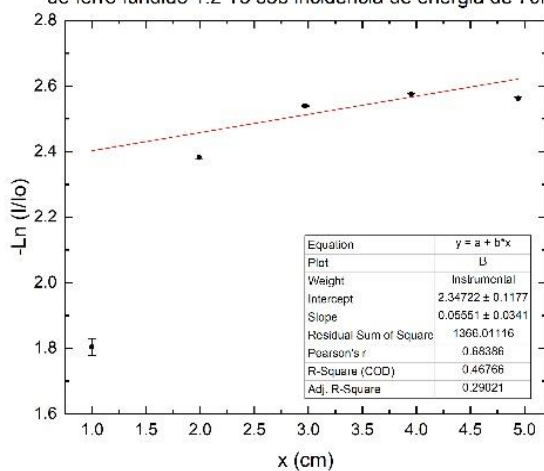
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T2 sob incidência de energia de 125kV



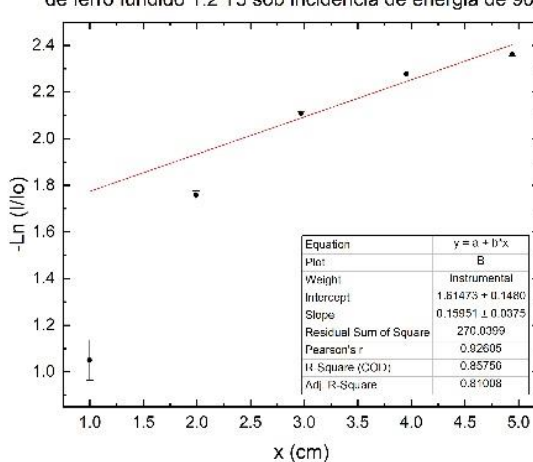
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T2 sob incidência de energia de 160kV



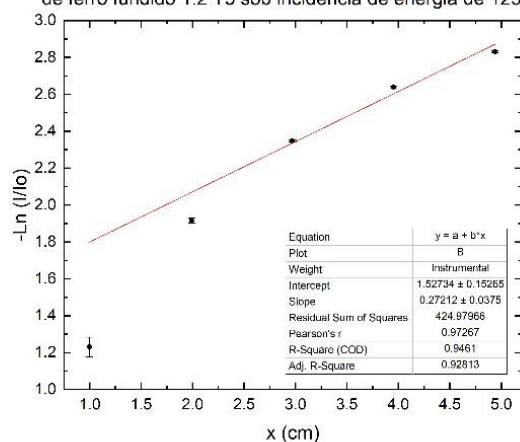
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T3 sob incidência de energia de 70kV



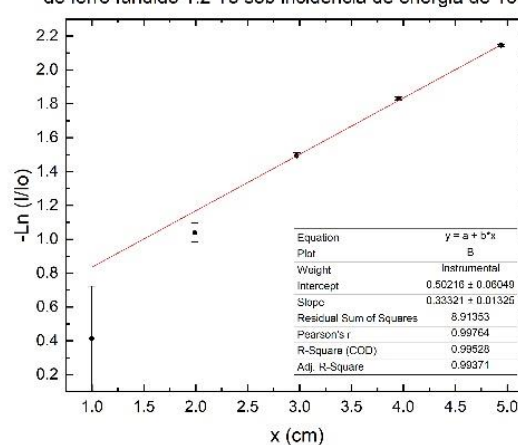
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T3 sob incidência de energia de 90kV



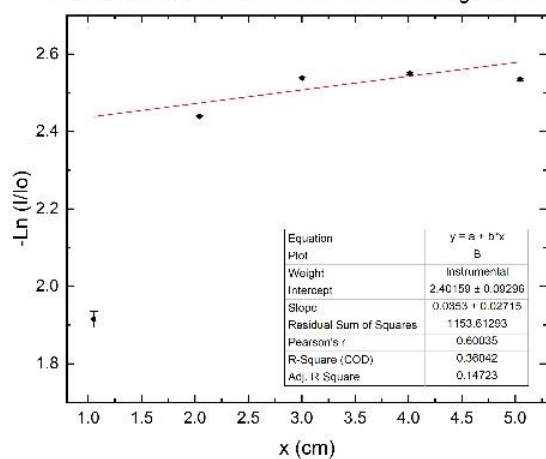
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T3 sob incidência de energia de 125kV



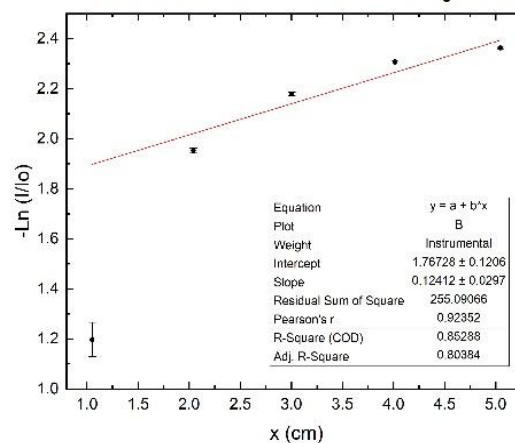
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T3 sob incidência de energia de 160kV



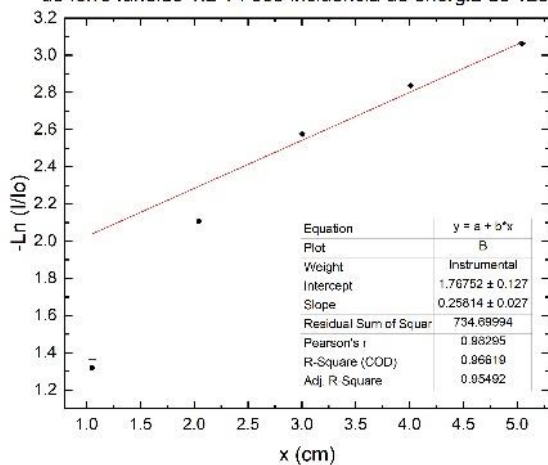
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T4 sob incidência de energia de 70kV



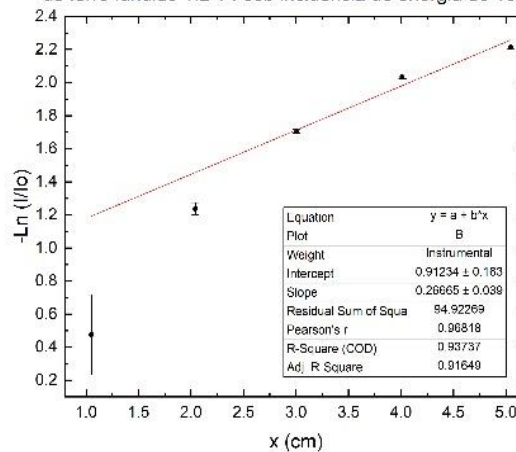
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T4 sob incidência de energia de 90kV



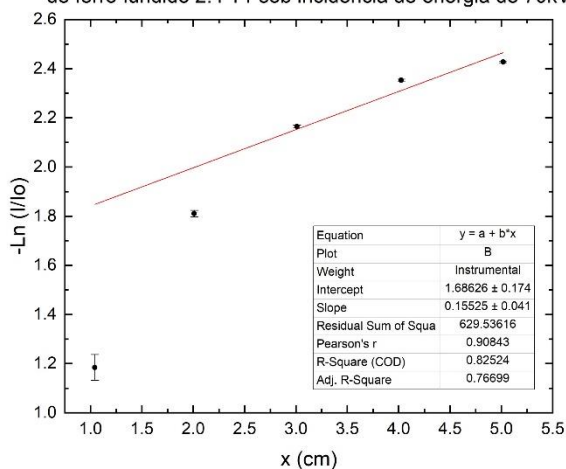
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T4 sob incidência de energia de 125kV



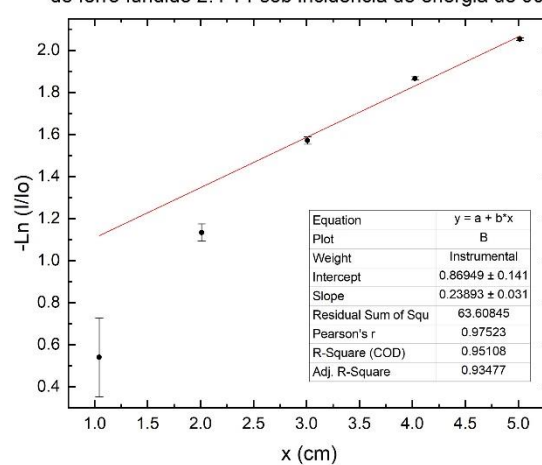
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 1.2 T4 sob incidência de energia de 160kV



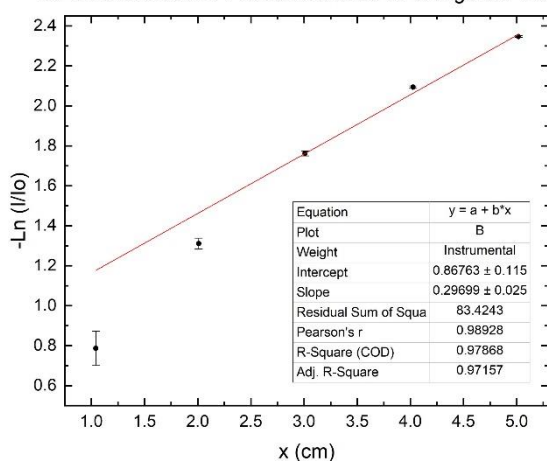
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T1 sob incidência de energia de 70kV



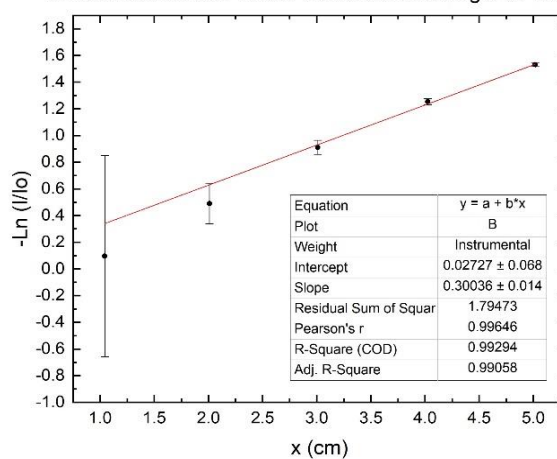
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T1 sob incidência de energia de 90kV



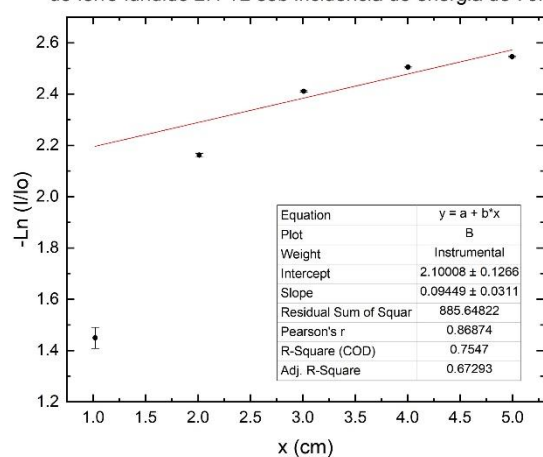
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T1 sob incidência de energia de 125kV



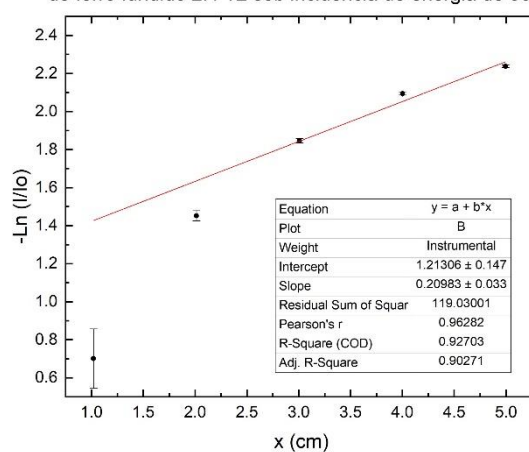
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T1 sob incidência de energia de 160kV



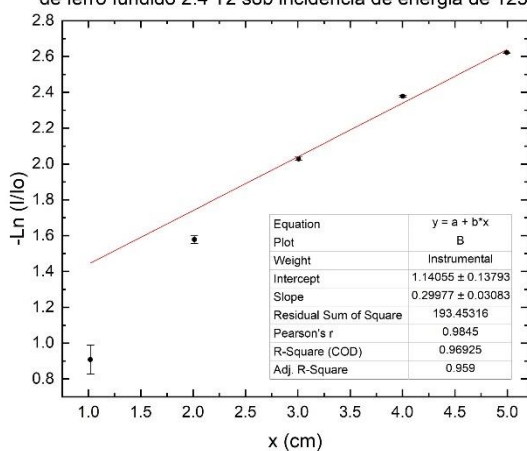
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T2 sob incidência de energia de 70kV



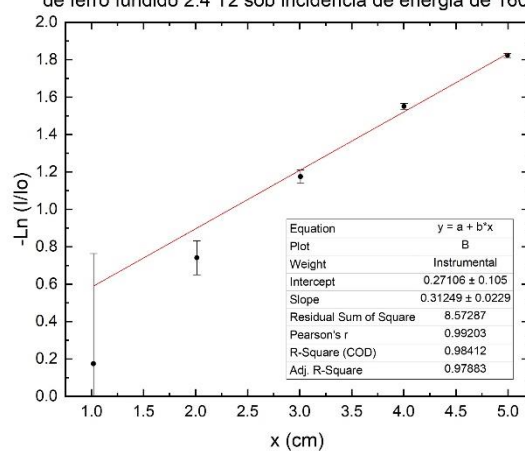
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T2 sob incidência de energia de 90kV



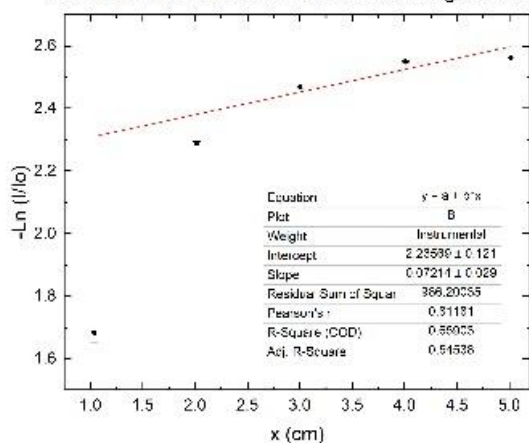
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T2 sob incidência de energia de 125kV



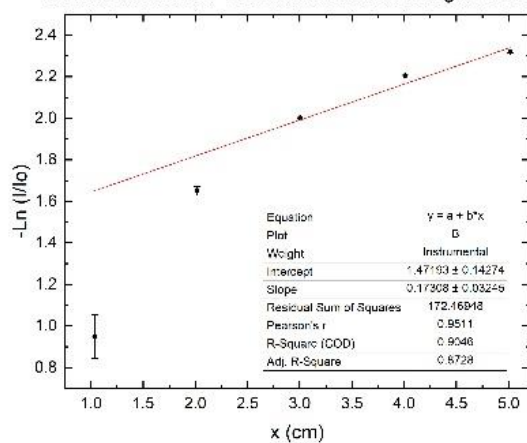
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T2 sob incidência de energia de 160kV



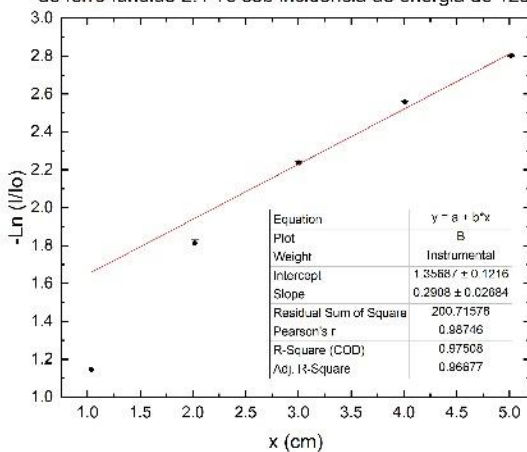
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T3 sob incidência de energia de 70kV



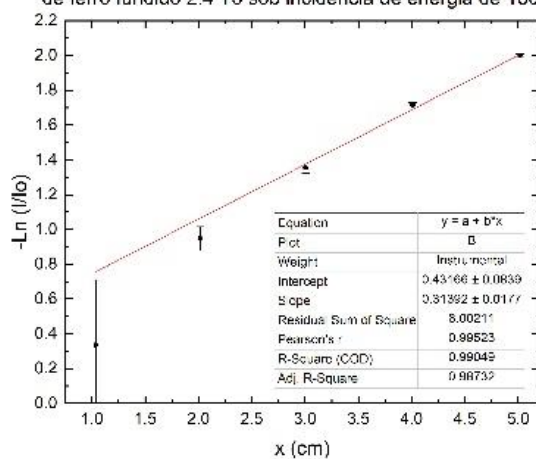
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T3 sob incidência de energia de 90kV



Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T3 sob incidência de energia de 125kV

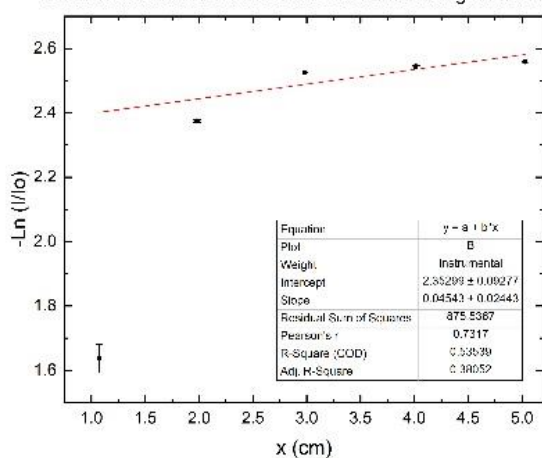


Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T3 sob incidência de energia de 160kV

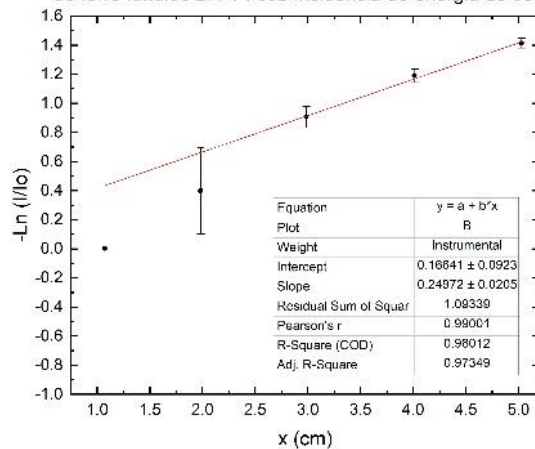




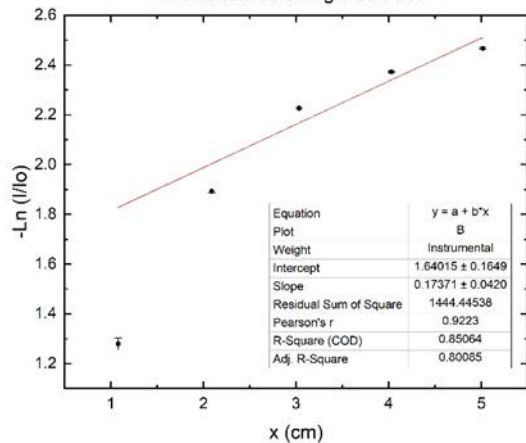
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T4 sob incidência de energia de 70kV



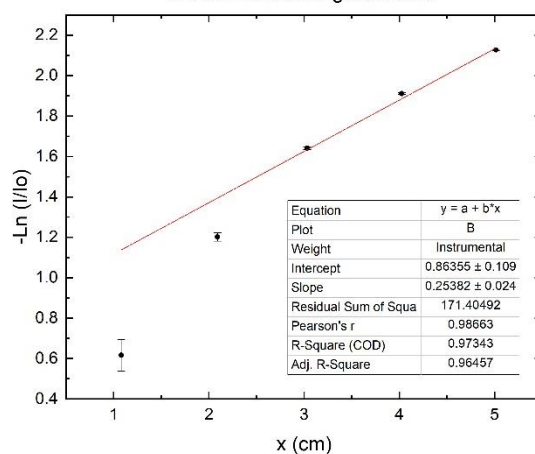
Intensidade relativa em função da espessura da argamassa com limalha de ferro fundido 2.4 T4 sob incidência de energia de 90kV



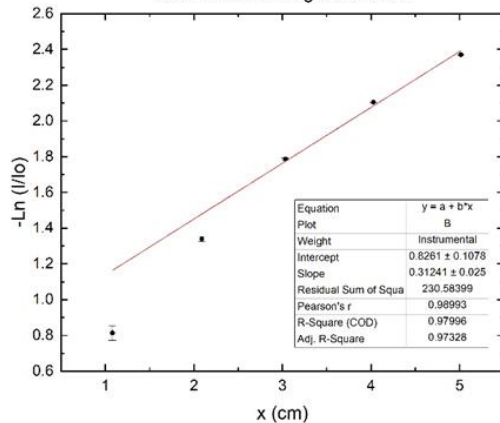
Intensidade relativa em função da espessura do concreto sob incidência de energia de 70kV



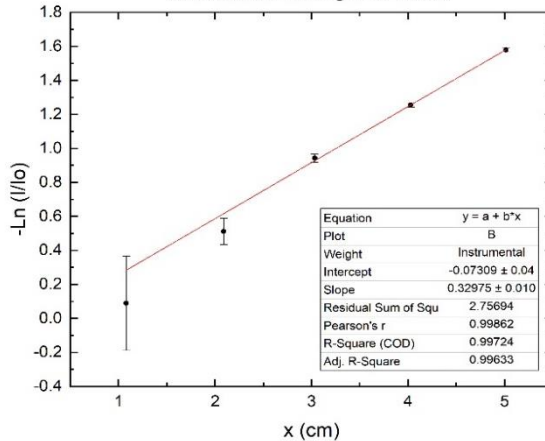
Intensidade relativa em função da espessura do concreto sob incidência de energia de 90kV



Intensidade relativa em função da espessura do concreto sob incidência de energia de 125kV



Intensidade relativa em função da espessura do concreto sob incidência de energia de 160kV



## APÊNDICE B

### Imagens programa ImageJ – Tons de Cinza

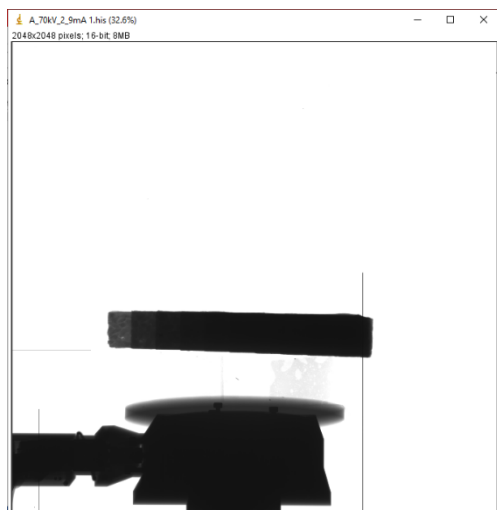


Imagem ImageJ – amostra de concreto e com aplicação de energia 70 keV

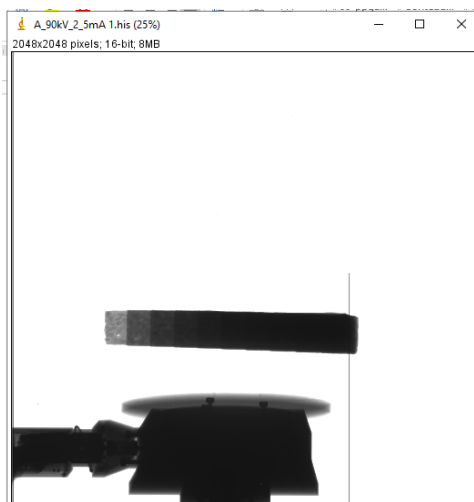


Imagem ImageJ – amostra de concreto e com aplicação de energia 90 keV

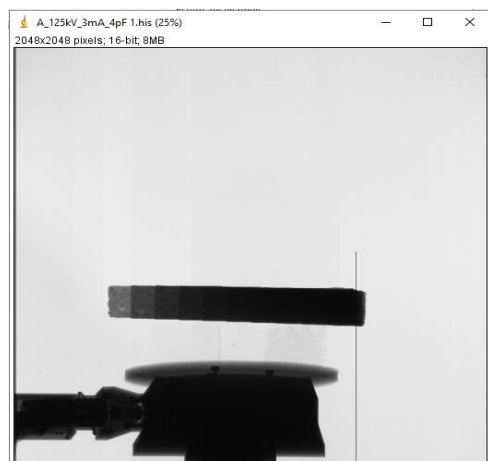


Imagem ImageJ – amostra de concreto e com aplicação de energia 125 keV



Imagem ImageJ – amostra de concreto e com aplicação de energia 160 keV

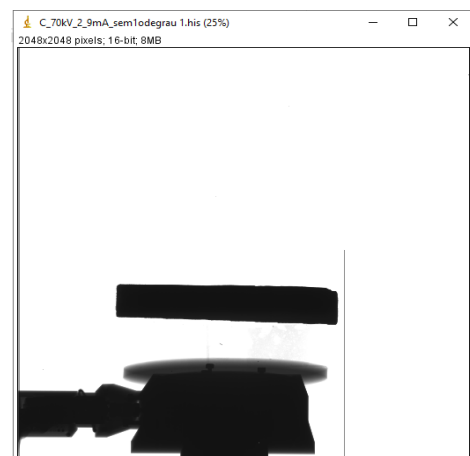


Imagem ImageJ – amostra de argamassa baritada e com aplicação de energia 70 KeV

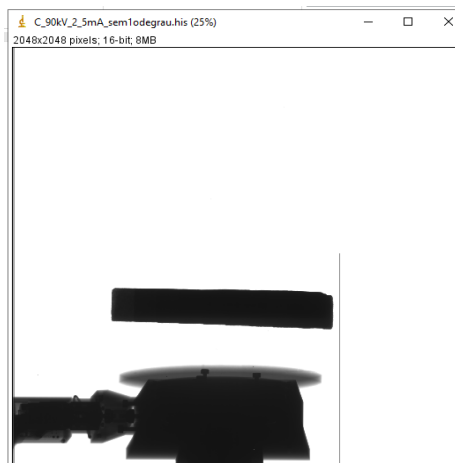


Imagem ImageJ – amostra de argamassa baritada e com aplicação de energia 90 KeV

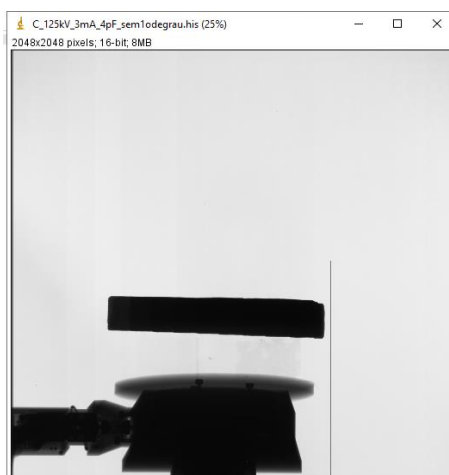


Imagem ImageJ – amostra de argamassa baritada e com aplicação de energia 125 KeV

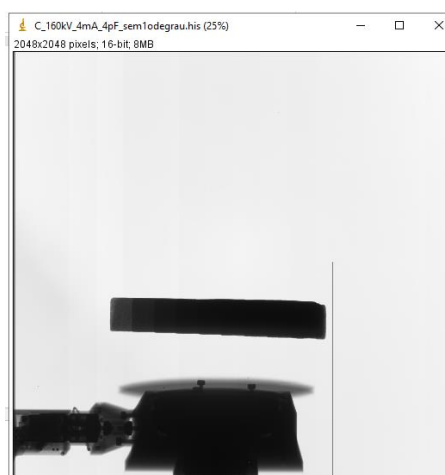


Imagem ImageJ – amostra de argamassa baritada e com aplicação de energia 160 KeV



Imagem ImageJ – amostra de chumbo e com aplicação de energia 160 KeV



Imagem ImageJ – amostra de chumbo e com aplicação de energia 188 KeV

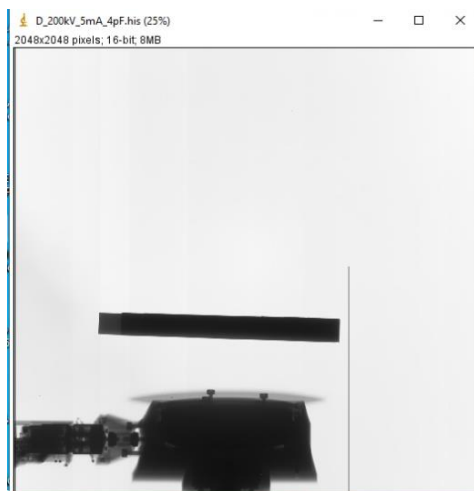


Imagem ImageJ – amostra de chumbo e com aplicação de energia 200 KeV

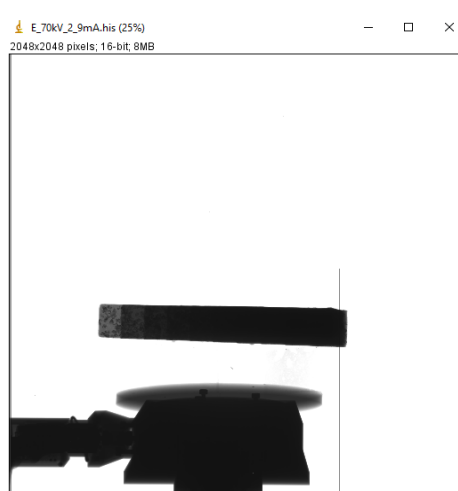


Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 2,4mm (Traço 1) e com aplicação de energia 70 KeV

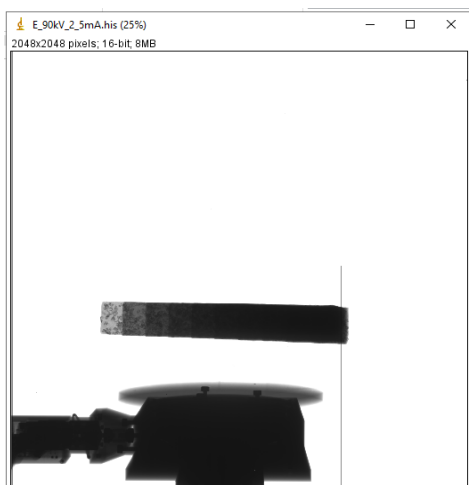


Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 2,4mm (Traço 1) e com aplicação de energia 90 KeV

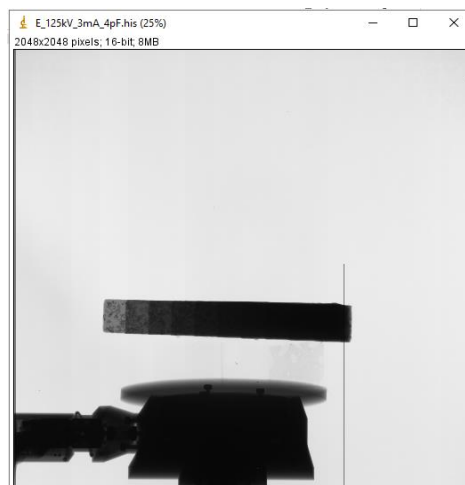


Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 2,4mm (Traço 1) e com aplicação de energia 125 KeV

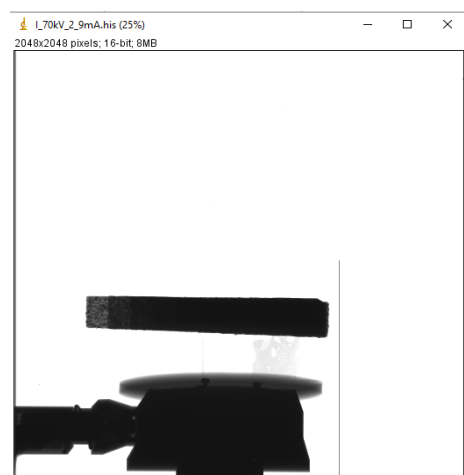


Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 2,4mm (Traço 1) e com aplicação de energia 160 KeV

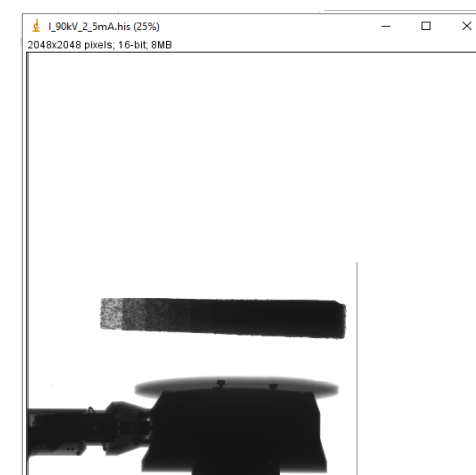


Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 1,2mm (Traço 1) e com aplicação de energia 70 KeV

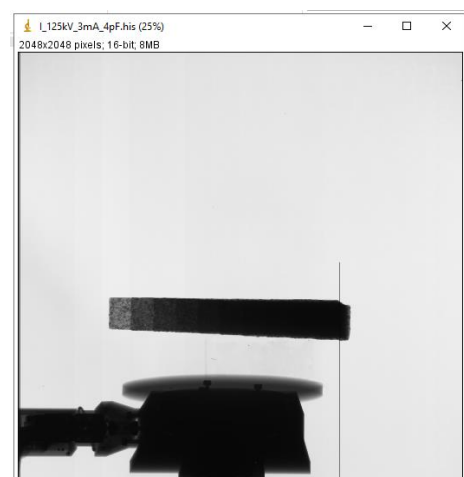


Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 1,2mm (Traço 1) e com aplicação de energia 90 KeV

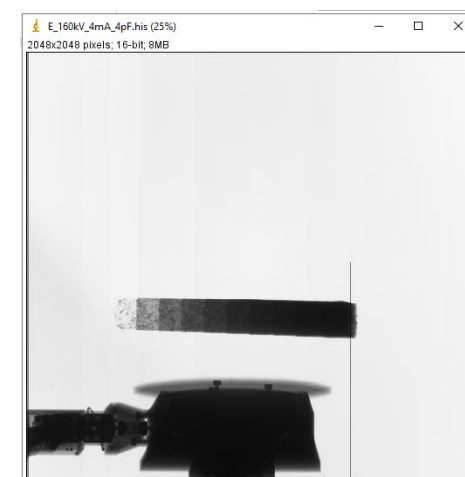


Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 1,2mm (Traço 1) e com aplicação de energia 125 KeV

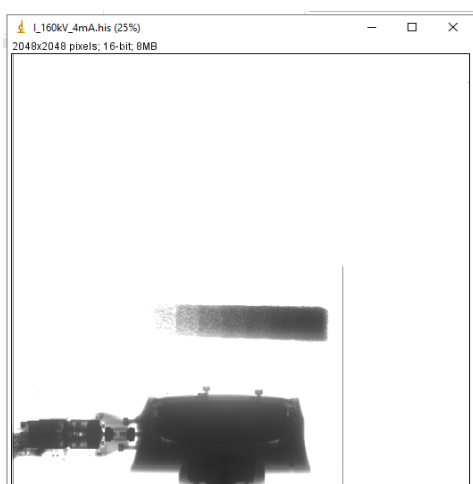


Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 1,2mm (Traço 1) e com aplicação de energia 160 KeV

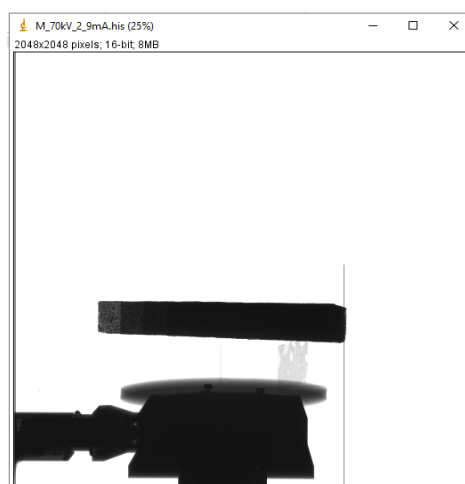


Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 0,6mm (Traço 1) e com aplicação de energia 70 KeV

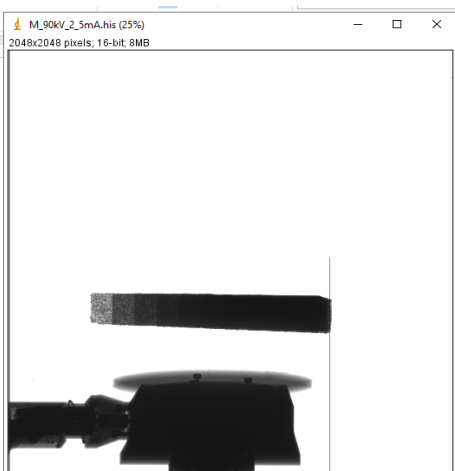


Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 0,6mm (Traço 1) e com aplicação de energia 90 KeV



Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 0,6mm (Traço 1) e com aplicação de energia 125 KeV



Imagem ImageJ – amostra de argamassa de limalha de ferro fundido 0,6mm (Traço 1) e com aplicação de energia 160 KeV

## APÊNDICE C – Memorial de Cálculo

Exemplificação do memorial de cálculo (tons de cinza (*I* e *Io*), desvio padrão, espessuras médias e linearização)  
Amostra A (concreto) e energias incidentes de 70 keV, 90 keV, 125 keV e 160 keV

1 cm		2cm		3cm		4cm		5cm	
A		A		A		A		A	
70KV 2 9mA		70KV 2 9mA		70KV 2 9mA		70KV 2 9mA		70KV 2 9mA	
i1	18.233.430	i2	9.872.148	i3	7.068.972	i4	6.110.000	i5	5.561.190
dsv padrão i1	1.892.842	dsv padrão i2	716.583	dsv padrão i3	475.484	dsv padrão i4	538.129	dsv padrão i5	538.751
Io	65.535.000	Io	65.535.000	Io	65.535.000	Io	65.535.000	Io	65.535.000
dsv padrão Io	0	dsv padrão Io	0	dsv padrão Io	0	dsv padrão Io	0	dsv padrão Io	0
I/lo	0,278224308	I/lo	0,150639322	I/lo	0,107865599	I/lo	0,093232624	I/lo	0,08485832
ln I/lo	-1,279327629	ln I/lo	-1,892866892	ln I/lo	-2,226869285	ln I/lo	-2,37265758	ln I/lo	-2,466772237
erro I/lo	0,028882918	erro I/lo	0,010934356	erro I/lo	0,007255421	erro I/lo	0,008211322	erro I/lo	0,008220813
espessura	1,08	espessura	2,09	espessura	3,0325	espessura	4,03	espessura	5,02
erro da espessura	0,035471147	erro da espessura	0,037116075	erro da espessura	0,035597153	erro da espessura	0,03593101	erro da espessura	0,030979031
erro I/lo corrigido	0,030038234	erro I/lo corrigido	0,01137173	erro I/lo corrigido	0,007545638	erro I/lo corrigido	0,008539775	erro I/lo corrigido	0,008549646
erro do ln/lo corrig	-0,023479704	erro do ln/lo corrig	-0,006007675	erro do ln/lo corrig	-0,003388451	erro do ln/lo corrig	-0,00359924	erro do ln/lo corrig	-0,003465924

1 cm		2cm		3cm		4cm		5cm	
A		A		A		A		A	
90KV 2 5 mA		90KV 2 5 mA		90KV 2 5 mA		90KV 2 5 mA		90KV 2 5 mA	
i1	35.355.728	i2	19.699.792	i3	12.700.575	i4	9.695.017	i5	7.810.035
dsv padrão i1	3.026.363	dsv padrão i2	1.591.857	dsv padrão i3	725.158	dsv padrão i4	526.660	dsv padrão i5	418.074
Io	65.535.000	Io	65.535.000	Io	65.535.000	Io	65.535.000	Io	65.535.000
dsv padrão Io	0	dsv padrão Io	0	dsv padrão Io	0	dsv padrão Io	0	dsv padrão Io	0
I/lo	0,539493828	I/lo	0,300599557	I/lo	0,193798352	I/lo	0,147936477	I/lo	0,119173495
ln I/lo	-0,617123935	ln I/lo	-1,201976274	ln I/lo	-1,640937083	ln I/lo	-1,91097231	ln I/lo	-2,127174906
erro I/lo	0,046179339	erro I/lo	0,024290181	erro I/lo	0,011065202	erro I/lo	0,008036316	erro I/lo	0,0063794
espessura	1,08	espessura	2,09	espessura	3,0325	espessura	4,03	espessura	5,02
erro da espessura	0,035471147	erro da espessura	0,037116075	erro da espessura	0,035597153	erro da espessura	0,03593101	erro da espessura	0,030979031
erro I/lo corrigido	0,048026513	erro I/lo corrigido	0,025261788	erro I/lo corrigido	0,01150781	erro I/lo corrigido	0,008357769	erro I/lo corrigido	0,006634576
erro do ln/lo corrig	-0,077823125	erro do ln/lo corrig	-0,021016877	erro do ln/lo corrig	-0,00701295	erro do ln/lo corrig	-0,00437357	erro do ln/lo corrig	-0,003118961

1 cm		2cm		3cm		4cm		5cm	
A		A		A		A		A	
125KV 3 mA 4pF		125KV 3 mA 4pF		125KV 3 mA 4pF		125KV 3 mA 4pF		125KV 3 mA 4pF	
i1	26.798.407	i2	15.721.994	i3	10.033.428	i4	7.232.745	i5	5.491.558
dsv padrão i1	1.964.330	dsv padrão i2	1.158.741	dsv padrão i3	542.813	dsv padrão i4	424.734	dsv padrão i5	543.279
Io	60.483.588	Io	59.968.815	Io	59.896.736	Io	59.393.979	Io	58.785.278
dsv padrão Io	136.238	dsv padrão Io	139.987	dsv padrão Io	152.346	dsv padrão Io	361.878	dsv padrão Io	233.035
I/lo	0,443069069	I/lo	0,262169496	I/lo	0,167512099	I/lo	0,121775727	I/lo	0,093417233
ln I/lo	-0,81402961	ln I/lo	-1,338764053	ln do tom	-1,786699695	ln I/lo	-2,10557423	ln I/lo	-2,370679445
erro I/lo	0,032477075	erro I/lo	0,019322393	erro do tom	0,00906248	erro I/lo	0,007151129	erro I/lo	0,009241753
espessura	1,08	espessura	2,09	espessura	3,0325	espessura	4,03	espessura	5,02
erro da espessura	0,035471147	erro da espessura	0,037116075	erro da espessura	0,035597153	erro da espessura	0,03593101	erro da espessura	0,030979031
erro I/lo corrigido	0,033776158	erro I/lo corrigido	0,020095289	erro I/lo corrigido	0,00942498	erro I/lo corrigido	0,007437174	erro I/lo corrigido	0,009611423
erro do ln/lo corrig	-0,041492542	erro do ln/lo corrig	-0,015010329	erro ln	-0,005275078	erro do ln/lo corrig	-0,00353214	erro do ln/lo corrig	-0,00405429

1 cm		2cm		3cm		4cm		5cm	
A		A		A		A		A	
160KV 4 mA 4pF		160KV 4 mA 4pF		160KV 4 mA 4pF		160KV 4 mA 4pF		160KV 4 mA 4pF	
i1	56.854.595	i2	36.901	i3	24.029.617	i4	17.592.583	i5	12.683.376
dsv padrão i1	1.491.083	dsv padrão i2	2.343.793	dsv padrão i3	1.301.492	dsv padrão i4	1.016.108	dsv padrão i5	895.459
Io	62.186.733	Io	61.544.991	Io	61.646.913	Io	61.771.816	Io	61.540.039
dsv padrão Io	54.409	dsv padrão Io	31.897	dsv padrão Io	56.857	dsv padrão Io	222.159	dsv padrão Io	83.530
I/lo	0,91425602	I/lo	0,000599578	I/lo	0,389794328	I/lo	0,284799511	I/lo	0,206099577
ln I/lo	-0,089644638	ln I/lo	-7,419285096	ln I/lo	-0,942136044	ln I/lo	-1,25596982	ln I/lo	-1,579395844
erro I/lo	0,02397751	erro I/lo	0,038082596	erro I/lo	0,021112038	erro I/lo	0,016449379	erro I/lo	0,014550836
espessura	1,08	espessura	2,09	espessura	3,0325	espessura	4,03	espessura	5,02
erro da espessura	0,035471147	erro da espessura	0,037116075	erro da espessura	0,035597153	erro da espessura	0,03593101	erro da espessura	0,030979031
erro I/lo corrigido	0,02493661	erro I/lo corrigido	0,039605899	erro I/lo corrigido	0,02195652	erro I/lo corrigido	0,017107354	erro I/lo corrigido	0,015132869
erro do ln/lo corrig	-0,2781718	erro do ln/lo corrig	-0,005338237	erro do ln/lo corrig	-0,023305042	erro do ln/lo corrig	-0,01362083	erro do ln/lo corrig	-0,009581429