



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

Análise da escória da metalurgia da cassiterita para utilização como agregado miúdo para a produção de argamassas de blindagem de raios X e Gama

LEONARDO PEREIRA LEOCÁDIO

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

**Orientador:
Prof. Dr. Carlos Alberto Zeituni**

**São Paulo
2022**

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

**Análise da escória da metalurgia da cassiterita para utilização como agregado
miúdo para a produção de argamassas de blindagem de raios X e Gama**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

LEONARDO PEREIRA LEOCÁDIO

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

**Orientador:
Prof. Dr. Carlos Alberto Zeituni**

**São Paulo
2022**

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

Como citar:

LEOCADIO, L. P. **Análise da escória da metalurgia da cassiterita para utilização como agregado miúdo para a produção de argamassas de blindagem de raios X e Gama**. 2022. 63 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

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

Leocadio, Leonardo Pereira

Análise da escória da metalurgia da cassiterita para utilização como agregado miúdo para a produção de argamassas de blindagem de raios X e Gama / Leonardo Pereira Leocadio; orientador Carlos Alberto Zeituni. -- São Paulo, 2022.
63 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2022.

1. Escória da metalurgia da cassiterita. 2. Argamassa. 3. Blindagem. I. Zeituni, Carlos Alberto, orient. II. Título.

LEONARDO PEREIRA LEOCÁDIO

Análise da escória da metalurgia da cassiterita para utilização como agregado miúdo para a produção de argamassas de blindagem de raios X e Gama

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Aplicações.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Zeituni

Data:22/11/2022

Banca examinadora

Prof. Dr. Carlos Alberto Zeituni

Instituição: IPEN - IPEN

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Dib Karam Junior

Instituição: EACH - USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Fernando de Souza Campos

Instituição: UNESP – Externo

Julgamento: Aprovado

Dedico à Maitê, Deborah, Afonso, Irís e Gleison.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Zeituni. Um modelo a ser seguido de um professor facilitador, parceiro e amigo. Tudo com ele parece fácil. Todo meu carinho, admiração, e a esperança de tomarmos “umas” no fechamento deste trabalho, pois foi assim que ele começou.

A minha querida esposa Deborah e a minha pequena Maitê pela paciência.

Aos meus pais, Afonso e Irís e ao meu irmão Gleison, que foi o meu propulsor intelectual.

Ao professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia, Carlos Bauer pelo empenho na viabilização da parceria IFRO/IPEN.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia pela parceria com o IPEN/USP, por não medir esforços na formação dos seus servidores e também pela disponibilidade de uso do laboratório para realização de uma das fases desta pesquisa.

Ao Geólogo Luiz Gilberto Dall'Igna e ao Engenheiro de Minas Severino Patrício pela ajuda da escolha do material/mineral, objeto desta pesquisa.

A minha ex-aluna, Laura Rafaela da Silva Viana por colaborar na pesquisa bibliográfica.

Aos meus alunos da graduação em engenharia civil – Samara Laís, Marcelo Resende, Clenes Gomes e Stella Lana pela colaboração na realização das pesquisas de laboratório.

A todos os professores e professoras do IPEN/USP pela dedicação e excelência que desenvolvem seus trabalhos. Estendo este agradecimento a todos os servidores e servidoras do IPEN.

No começo pensei que estivesse lutando para salvar seringueiras, depois pensei que estava lutando para salvar a Floresta Amazônica. Agora, percebo que estou lutando pela humanidade. (Chico Mendes)

RESUMO

LEOCADIO, L. P. *Análise da escória da metalurgia da cassiterita para utilização como agregado miúdo para a produção de argamassas de blindagem de raios X e Gama*. 2022. 63 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo.

A utilização dos raios X na área médica, principalmente na radiologia, no Brasil e no mundo, vem crescendo progressivamente. No âmbito da construção civil, uma das maneiras de se diminuir a exposição às radiações e, conseqüentemente, diminuir as doses é a utilização de barreiras às radiações (blindagens). Não diferentemente de outros países, no Brasil empregam-se vários tipos de materiais para a construção de proteções às radiações ionizantes. Quanto ao revestimento de ambientes, por exemplo, além do chumbo, outros materiais foram testados e aplicados. Foi investigada a utilização da escória da metalurgia da cassiterita como agregado miúdo para a produção de argamassas de revestimento na blindagem de raios X e raios Gama. A cassiterita é o principal mineral de estanho explorado no mundo, produzida comercialmente no Brasil. A pesquisa foi dividida em quatro etapas: 1. coleta do material no pátio da metalúrgica; 2. caracterização física da escória da metalurgia da cassiterita; 3. confecção da argamassa utilizando a escória como agregado miúdo; e 4. determinação experimental dos coeficientes de atenuação da argamassa de revestimento produzidas com a escória da metalurgia da cassiterita. A partir dos estudos demonstra-se que é inconteste o potencial do material para o que se propõe nesta pesquisa e a sua contribuição para pesquisas futuras, entretanto, o mesmo não é conclusivo para utilização da escória como argamassa para blindagem.

Palavras-chave: Escória da metalurgia da cassiterita. Argamassa. Blindagem.

ABSTRACT

LEOCADIO, L. P. Analysis of cassiterite metallurgy slag for use as fine aggregate for the production of X and Gamma ray shielding mortars. 2022. 63 p. Dissertation (Master in Nuclear Technology), Institute of Energy and Nuclear Research, IPEN-CNEN, São Paulo.

The use of X-rays in the medical field, mainly in radiology, in Brazil and in the world, has been growing progressively. In the field of civil construction, one of the ways to reduce exposure to radiation and, consequently, reduce doses is the use of radiation barriers (shielding). Not unlike other countries, in Brazil several types of materials are used to build protection against ionizing radiation. As for the coating of environments, for example, in addition to lead, other materials were tested and applied. The use of cassiterite metallurgy slag as a fine aggregate for the production of coating mortars for shielding X-rays and Gamma rays was investigated. Cassiterite is the main tin mineral explored in the world, commercially produced in Brazil. The research was divided into four stages: 1. collection of material in the metallurgical yard; 2. physical characterization of cassiterite metallurgy slag; 3. Preparation of mortar using slag as fine aggregate; and 4. experimental determination of the attenuation coefficients of the coating mortar produced with cassiterite metallurgy slag. From the studies it is demonstrated that the potential of the material for what is proposed in this research and its contribution to future research is undeniable, however, it is not conclusive for the use of slag as mortar for shielding.

Keywords: Cassiterite metallurgy slag. Mortar. shielding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Energia do fóton incidente em função do material absorvedor.....	20
Figura 2 – Produção Brasileira de Cassiterita (t de Sn contido)	28

LISTA DE FLUXOGRAMA

Fluxograma 1 – Fluxograma do Processo de Redução e Refino da Cassiterita em Forno Elétrico.....	29
--	----

LISTA DE FOTOS

Foto 1 –Escória da metalurgia da cassiterita depositada a céu aberto.....	30
Foto 2 – Escória da metalurgia da cassiterita	34
Foto 3 – Amostra da escória reduzida no laboratório	36
Foto 4 – Ensaio de granulometria.....	37
Foto 5 – Testes experimentais da argamassa.....	42
Foto 6 – Confeção dos traços de argamassa com agregado miúdo da escória da metalurgia da cassiterita	42
Foto 7 – Determinação do índice de consistência. Argamassa produzida com escória da metalurgia da cassiterita.....	43
Foto 8 – Moldagem dos corpos de prova da argamassa.....	44
Foto 9 – Corpos de prova da argamassa produzida com agregado miúdo de escória da metalurgia da cassiterita.....	45
Foto 10 – Detector HPGe	47
Foto 11 – Fonte de ^{137}Cs	48
Foto 12 – Aparato experimental: fonte, corpo de prova e detector	49
Foto 13 – Aparato experimental para as leituras de atenuação – detalhe.....	50

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 – Mapa de localização do Município de Ariquemes no estado de Rondônia, Brasil	33
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quantidade de amostras a serem coletadas para ensaios físicos ou químicos	34
Quadro 2 – Massa mínima, por amostra de ensaio	37
Quadro 3 – Análise de Agregados	51
Quadro 4 – Porcentagens da Granulometria do Agregado Miúdo	52
Quadro 5 – Testes de blindagem – Leituras de atenuação	54

LISTA DE ESQUEMAS

Esquema 1 – Ensaio de caracterização a ser realizado na amostra	35
Esquema 2 – Desenho esquemático: distância entre a fonte, corpo de prova e detector	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Blindagem média	55
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultado do ensaio de Blindagem	55
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
BIRD	Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento
Bq	Becquerel
C	Carbono
dE	Energia depositada
dm	Unidade de massa
G	Gray
H	Hidrogênio
HPGe	Detector germânio hiperpuro
IFRO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
kV	Kilovolt
MME	Ministério de Minas e Energia
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
MeV	Megaelétron-volt
SI	Sistema Internacional
Sv	Sievert

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO	14
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA	16
2.2 INTERAÇÃO DOS RAIOS X COM A MATÉRIA	17
2.2.1 Efeito fotoelétrico	19
2.2.2 Espalhamento coerente	20
2.2.3 Espalhamento Compton	21
2.3 A PRODUÇÃO DOS RAIOS X	21
2.3.1 Atividade	22
2.3.2 Exposição	23
2.3.3 Kerma do ar	23
2.3.4 Dose Efetiva	23
2.3.5 Dose Absorvida	24
2.3.6 Dose Equivalente	24
2.4 DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE RADIOPROTEÇÃO	25
2.5 MATERIAIS DE BLINDAGEM	25
2.5.1 Concreto	26
2.5.2 Aço e Chumbo	26
2.5.3 Argamassa baritada	27
2.5.4 Materiais Cerâmicos	27
2.6 A ESCÓRIA DA METALURGIA DA CASSITERITA	28
2.6.1 Escória de Metalurgia	28
2.6.2 Escória da Cassiterita	29
2.6.3 A escória da metalurgia da cassiterita e meio ambiente	29
3 METODOLOGIA	32
3.1 COLETA DA ESCÓRIA DA METALURGIA DA CASSITERITA	32
3.1.1 Material	32
3.1.2 Método	33
3.1.2.1 Amostragem	33
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA NO LABORATÓRIO	35

3.2.1 Material	35
3.2.2 Método	35
3.2.2.1 Redução da Amostra.....	35
3.2.2.2 Análise Granulométrica	36
3.2.2.3 Determinação da Massa Específica	38
3.2.2.4 Determinação do Material Pulverulento.....	40
3.3 Confeção dos traços de argamassa de revestimento.....	40
3.3.1 Materiais	40
3.3.2 Método	41
3.3.2.1 Confeção da Argamassa de Revestimento	41
3.3.2.2 Determinação do Índice de Consistência	43
3.3.2.3 Moldagem dos corpos de prova	44
3.4 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DA ARGAMASSA.....	46
3.4.1 Equipamentos	46
3.4.1.1 Detector HPG e módulos eletrônicos	46
3.4.1.2 Fonte de ¹³⁷ Cs.....	47
3.4.2 Método	48
4 RESULTADOS	51
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA NO LABORATÓRIO.....	51
4.1.1 Análise Granulométrica	51
4.1.2 Determinação da Massa Específica	52
4.1.3 Determinação do Material Pulverulento	52
4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA NO LABORATÓRIO.....	52
4.2.1 Determinação do Índice de Consistência	52
4.3 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DA ARGAMASSA.....	53
5 DISCUSSÃO E TRABALHOS FUTUROS	56
5.1 O MATERIAL: ESCÓRIA DA METALURGIA DA CASSITERITA	56
5.2 A ARGAMASSA COM ESCÓRIA DA METALURGIA DA CASSITERITA	57
5.3 AS AMOSTRAS E A PERFORMANCE PARA BLINDAGEM	57
6 CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção é apresentado a introdução deste trabalho. Definimos o estudo a partir de um material que é um subproduto da fundição da cassiterita e definimos o objetivo da investigação. Logo depois, mostraremos a estrutura de todo o trabalho.

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

A matéria-prima deste estudo é um subproduto da fundição da cassiterita. O nome apropriado deste material é escória da metalurgia da cassiterita. A principal motivação para iniciarmos este trabalho foi de buscar um mineral de massa específica alta, oriundo da região norte do país, mais precisamente de Rondônia, capaz proporcionar alguma blindagem contra radiações numa possível utilização deste material como agregado miúdo em argamassas. A partir desta motivação definimos este objetivo:

- Analisar a possibilidade de utilização da escória da metalurgia da cassiterita como agregado miúdo para a produção de argamassas de revestimento na blindagem de raios X e raios Gama.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho compreende:

- Revisão bibliográfica: nesta seção passamos por temas relevantes do estudo da radiação: proteção radiológica, interação do raio X com a matéria, produção do raio X, blindagens e, por último, informações sobre a produção de cassiterita e o impacto para o meio ambiente.
- Metodologia: nesta seção apresentaremos toda metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho. Demonstraremos que a pesquisa foi dividida em quatro partes: coleta do material, ensaio na amostra coletada, confecção da argamassa e, por fim, o ensaio para verificação da blindagem.

- Resultados: nesta seção demonstramos o resultado dos ensaios realizados tanto na caracterização do material, bem como na produção da argamassa e, por fim, os resultados da blindagem.
- Discussão: analisamos os resultados obtidos e as possibilidades que teremos a partir desta pesquisa.
- Conclusão: fechamos este estudo com as informações obtidas nos ensaios e fazemos proposições para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção abordaremos temas e conceitos relacionados diretamente à linha de pesquisa deste trabalho. Faremos breve descrição sobre a escória de metalurgia da cassiterita e, por fim, incluiremos aspectos ambientais importantes sobre a legislação vigente.

2.1 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Em radiologia diagnóstica, a proteção radiológica tem como pressuposto principal fornecer condições de trabalho seguro aos radiologistas e técnicos de raios X. É por meio dela que se trabalha na conscientização dos radiologistas e técnicos quanto a necessidade de utilizar técnicas radiográficas que permitam redução de dose de radiação nos pacientes e impedir, através de materiais atenuadores, a incidência de radiação nas vizinhanças do setor de radiologia em níveis superiores aos estabelecidos por normas técnicas.

Para além disso, existem outras formas de proteção às radiologias, dentre elas, Albuquerque (2014) cita a diminuição do tempo de exposição à fonte da radiação; e o aumento da distância entre a fonte da radiação e os indivíduos. No primeiro caso, encontra-se como empecilho o fato de que em muitas aplicações o valor da exposição resultante é diretamente proporcional ao tempo de exposição, e no caso da segunda, está limitada ao espaço disponível para a instalação de equipamentos e às condições de trabalho e manuseio de instrumentos e ferramentas.

Os aparelhos de raios X de um serviço radiológico devem ser, sempre que possível, instalados em um único local. As salas devem ter dimensões compatíveis com uso dos equipamentos e com a movimentação da equipe e dos pacientes. O painel de controle do aparelho de raios X deve estar situado em uma posição onde seja possível ver e falar com o paciente. As portas das salas de raios X devem ser sinalizadas de modo a evitar a entrada inadvertida de pessoas, com consequente exposição desnecessária (FRIMAIO, 2006).

2.2 INTERAÇÃO DOS RAIOS X COM A MATÉRIA

Quando o feixe de raios X atravessa um material, seus fótons podem interagir com os átomos de diferentes maneiras. Pereira (2005) entende que os fatores que afetam as interações da radiação com a matéria são: a densidade, a espessura, o número atômico do material e a energia do fóton incidente. No contexto biológico, radiações ionizantes são aquelas capazes de ejetar os elétrons orbitais átomos de Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O) e Nitrogênio (N). A quantidade de energia depositada por uma radiação ionizante ao atravessar um material depende da natureza química do material e de sua massa específica. Para além disso, é importante ressaltar que a absorção de radiações ionizantes pela matéria é um fenômeno atômico e não molecular.

Para Evans (1982), os tipos de interação de fótons com a matéria mais frequentes são o fotoelétrico, o espalhamento Compton, o espalhamento coerente e a produção de pares. As interações onde o fóton perde energia (efeito fotoelétrico e espalhamento Compton) são as únicas que ocorrem na área de radiologia diagnóstica, uma vez que a produção de pares só ocorre quando a energia do fóton for maior do que 1,02 MeV.

Todos os processos removem fótons do feixe e, por isso, é dito que eles atenuam o feixe de raios X. A probabilidade de ocorrência depende da energia do fóton e da composição do material, estando relacionada com os coeficientes de atenuação. Pode-se dizer que o coeficiente de atenuação é medida indireta da probabilidade de certo tipo de átomo interagir, através de determinado processo, com um fóton, de dada energia (FRIMAIO, 2006).

Quando se fala apenas em coeficiente de atenuação, sem especificar o processo de interação, considera-se o coeficiente de atenuação resultante, que é o somatório dos coeficientes de atenuação de cada processo. Para Costa (1999), a atenuação dos raios X pela matéria se dá pelos efeitos de espalhamento de absorção de energia. Em um exame diagnóstico são utilizados feixes de raios X com tensões inferiores a 150kV, e, nestas condições, a radiação é espalhada devido aos efeitos coerente e Compton, enquanto a absorção da radiação ocorre devido ao efeito fotoelétrico.

A atenuação que um feixe monocromático de raios X sofre ao atravessar uma lâmina de espessura X é calculada através da equação dada por (ATTIX, 1986; JONHS; CUNNINGHAN, 1974):

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (1)$$

Em que:

- I_x é a intensidade do feixe emergente da espessura x ;
- I_0 intensidade do feixe incidental no material; e
- μ é o coeficiente de atenuação do material para a energia do feixe monocromático.

Quando a espessura apresentar dimensão de comprimento (L), o coeficiente será de atenuação linear e apresentará dimensão L^{-1} , geralmente dada em cm^{-1} . O coeficiente de atenuação linear representa a probabilidade de ocorrer interação por unidade de comprimento. O produto μx é chamado de absorvência e representa a probabilidade de ocorrer interação no material de espessura x . A grandeza chamada de transmitância é igual à razão entre as intensidades I_x e I_0 , representando a probabilidade do feixe não sofrer interação ao atravessar o material de espessura x (GONDIM, 2009).

Quando a espessura for dada em termos de densidade superficial de massa, dimensão ML^{-2} , o coeficiente será de atenuação de massa e apresentará dimensão de $L^2 M^{-1}$, geralmente dada em cm^2/g . A equação estendida para um espectro de raios X é representada como:

Em que:

$$I_x = \int_0^{Emax} N(E) \cdot e^{-\mu(E)x} dE \quad (2)$$

- $N(E)$ representa o espectro de raios X incidente;
- x é a espessura do material; e

- $\mu(E)$ é o coeficiente de atenuação linear do material.

2.2.1 Efeito fotoelétrico

O processo de interação entre um fóton e um elétron fortemente ligado a um átomo é chamado efeito fotoelétrico. Nesta interação, o fóton é completamente absorvido e o elétron orbital é ejetado com energia cinética E (COSTA, 2011).

A energia transferida é parcialmente usada pelo elétron para romper a sua ligação, a excedente é transformada em energia cinética do elétron ejetado de tal maneira que:

$$E_c = hV - E_l \quad (3)$$

Em que:

- E_C é a energia cinética do elétron ejetado;
- $h\nu$ é a energia do fóton incidente; e
- E_L é a energia de ligação do elétron.

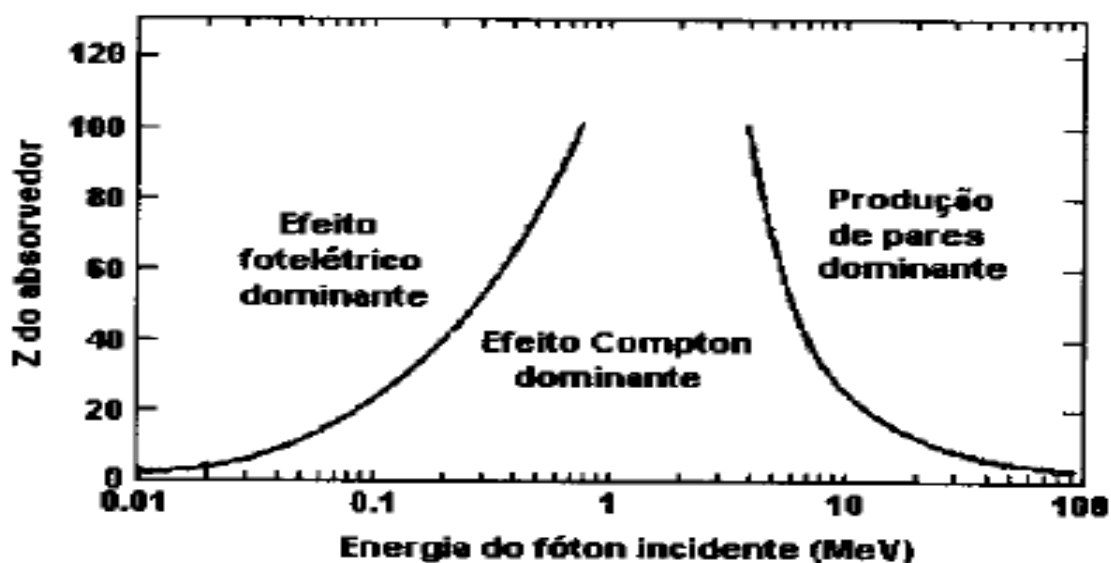
Os elétrons ejetados são chamados de fotoelétrons, quando um destes deixa o átomo é criada lacuna na camada correspondente. A lacuna é imediatamente preenchida por um elétron que provém de órbita mais externa e que tem, conseqüentemente, menos energia de ligação (FRIMAIO, 2006).

A energia E_e do elétron ejetado é a diferença entre a energia $h\nu$ do fóton incidente e a energia $E_{Máx}$ de ligação do elétron orbital. Para o caso em que o elétron não gasta nenhuma energia adicional, sua energia cinética pode ser dada pela expressão:

$$E_e = hV - E_{Máx} \quad (4)$$

Attix (1986) entende que o efeito fotoelétrico é predominantemente para energias baixas e para elementos de número atômico Z elevado, sendo proporcional a Z^3 , conforme Figura 1:

Figura 1 – Energia do fóton incidente em função do material absorvedor



Fonte: (ATTIX, 1986).

Para Knoll (2010) e Cesareo (1992), à alta probabilidade de interação fotoelétrica com elementos de número atômico elevado se deve a utilização de elementos como o chumbo para blindagem de raios X e radiação Gama de energia baixa.

2.2.2 Espalhamento coerente

Nessa interação, o fóton de raio X interage com os elétrons orbitais dos átomos da matéria. Esses elétrons oscilam por um período muito curto e, depois, um outro fóton de mesma energia é liberado e se propaga em direção diferente. Esse tipo de interação é mais provável para fótons de energia baixa.

O nome espalhamento coerente é dado àquelas interações em que a radiação sofre mudança na direção sem mudar o comprimento de onda, ou seja, sem variação de energia. Por essa razão, utiliza-se o termo “espalhamento não modificado” (SCAFF, 1997).

Neste efeito, um fóton incidente (comprimento de onda λ) interage com um átomo deixando-o excitado. Para voltar ao seu estado original, o átomo todo vibra, reemitindo o mesmo fóton (ainda com o mesmo comprimento de onda $\lambda = \lambda'$), mudando apenas a direção (ângulo) do fóton.

2.2.3 Espalhamento Compton

No espalhamento Compton, o fóton remove do átomo um elétron orbital (elétron de recuo) que é espalhado com energia menor. Sendo a energia de ligação do elétron orbital desprezível em relação à energia do fóton incidente, pode-se dizer que, no espalhamento Compton os fótons interagem com elétrons livres, a energia cinética do elétron de recuo, E_C , será dada por:

$$E_c = hV - hV' \quad (5)$$

Em que:

- hV é a energia do fóton incidente; e
- hV' é a energia do fóton espalhado.

Como no espalhamento Compton, o fóton interage com elétrons que são considerados livres, esse processo é independente do número atômico, e todos os materiais, através do espalhamento Compton, irão absorver a mesma quantidade de energia por elétron. Como todos os materiais apresentam praticamente o mesmo número de elétrons por unidade de massa, todos eles apresentarão o mesmo coeficiente de atenuação de massa para o espalhamento Compton (JONHS; CUNNINGHAN, 1974; KLEVENHAGEN, 1993).

2.3 A PRODUÇÃO DOS RAIOS X

A produção de raios X tem origem na interação entre uma partícula carregada com alta velocidade e um núcleo atômico. Os elétrons são as partículas usadas para produzir raios X para diagnóstico médico. Dentro de um tubo de raios X, os elétrons são acelerados em direção a um alvo eletricamente carregado, o anodo, quando os elétrons atingem o alvo eles são desacelerados abruptamente. Parte da energia dos elétrons é emitida na forma de raios X, mas, a maioria, aproximadamente 99%, é convertida em calor. A energia dos raios X depende do grau de interação com o

átomo alvo. Desta forma, há um espectro contínuo de energia de raios X para uma dada energia dos elétrons incidentes (WOOTON, 1993).

Quando a tensão é aplicada no tubo de raios X, é aumentada acima de certo valor crítico, característico do metal alvo, aparece uma intensidade máxima de calor bem definido para certos comprimentos de onda superposta ao espectro contínuo. Uma vez que elas são muito estreitas e seu comprimento é característico do metal alvo usado, estas são chamadas de linhas características. Estas linhas referem-se às camadas eletrônicas denominadas K, L, M, N em ordem crescente de comprimento de onda, todas as linhas juntas formam um espectro característico do metal usado como alvo (CULLITY; STOCK, 2001).

A literatura destaca alguns modelos para a determinação dos espectros referentes à radiação da fonte primária de raios X. No intervalo de energias utilizado no diagnóstico médio, amplamente discutido na esfera da comunidade científica mundial, existem diversos modelos matemáticos ou computacionais propostos, além de medidas experimentais realizadas (ARCHER; WAGNER, 1988; BIRCH; MARSHALL, 1979).

O modelo proposto por Tucker *et al.* (1991), por exemplo, apresenta um modelo computacional que permite simular o espectro da radiação X emitida por um tubo de raios X diagnóstico, levando em conta diversos parâmetros construtivos dele, tais como, o ângulo, o material do anodo e a tensão de operação.

2.3.1 Atividade

A atividade de um material radioativo é definida como sendo o número de transformações nucleares que ocorrem em uma dada amostra, por unidade de tempo.

Em que:

$$A = \frac{dN}{dt} [s^{-1}] \quad (6)$$

- N : número de átomos radioativos, contido na amostra ou material;
- $T_{1/2}$: tempo de meia-vida (é o intervalo de tempo necessário para que a atividade inicial de um radioisótopo decresça à metade).

A unidade adotada pelo Sistema Internacional (SI) para a Atividade é o becquerel (Bq), que corresponde a uma desintegração radioativa por segundo.

2.3.2 Exposição

A exposição é uma grandeza que mede a quantidade de ionização pela radiação X e pode ser definida pela seguinte expressão:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (7)$$

Em que dQ representa a soma de todas as cargas de mesmo sinal criados no ar quanto todos os elétrons liberados por fótons em um elemento de volume de ar de massa dm são completamente freados no ar. A unidade do SI de exposição é o coloumb por quilograma (IRD, 1999).

2.3.3 Kerma do ar

De acordo com o ICRU (1990), o Kerma (*kinetic energy released in matter*) é definido como o quociente entre dE_{tr} e dm em que dE_{tr} é o somatório das energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas e liberadas por partículas não carregadas dentro de uma massa dm de um material:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} [J \cdot kg^{-1} \text{ ou } Gy] \quad (8)$$

O kerma tem dimensões de energia por unidade de massa e se exprime por gray (Gy), sendo: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ (TUCKER *et al.* 1991).

2.3.4 Dose Efetiva

Conforme a lei básica de radiologia de 1979, a radiosensibilidade das células é diretamente proporcional à sua atividade reprodutiva e inversamente proporcional ao seu grau de diferenciação (SCAFF, 1997).

Foi por meio da publicação nº 60 de 1990 que a ICRP, com o intuito de comparar o dano biológico advindo de exposição uniforme, definiu a dose efetiva (E) para vários tecidos e órgãos do corpo, sendo ela:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (9)$$

Em que:

- w_T : é o fator de ponderação para órgãos ou tecidos;
- H_T : é a dose equivalente no tecido ou órgão.

A unidade de dose efetiva no SI é a mesma da dose equivalente HT .

2.3.5 Dose Absorvida

Refere-se a quantidade de energia depositada (dE) pela radiação ionizante em qualquer meio, por unidade de massa (dm) do material absorvedor:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (10)$$

A unidade de dose absorvida no SI é o joule por quilograma e recebe também o nome de Gray (Gy).

2.3.6 Dose Equivalente

Diferentes tipos de radiação podem produzir diferentes efeitos biológicos (para a mesma dose absorvida). Foi, portanto, necessária à introdução de nova grandeza que pudesse ponderar esta dependência com a qualidade da radiação, a dose equivalente (SCAFF, 1997).

A dose equivalente no tecido ou órgão, H_T , em um órgão ou tecido T devido à radiação R é dada por:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (11)$$

Em que:

- W_R é o fator de peso da radiação;
- $D_{T,R}$ é a dose absorvida média no tecido ou órgão T, para uma dada radiação R.

A unidade da dose equivalente no SI é o joule por quilograma que recebe o nome especial de Sievert (Sv) (ICRP, 1990).

2.4 DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE RADIOPROTEÇÃO

Em se tratando da interposição de barreiras entre a fonte de radiação e os indivíduos, é importante saber que este é um método multidisciplinar onde se incorporam diversos aspectos (físicos, químicos, econômicos, ambientais e legais) que devem ser analisados para que a viabilidade esteja inserida num contexto técnico coerente.

Quando se projeta uma estrutura para atuar como proteção às radiações ionizantes, deve-se ter como principal objetivo a limitação das radiações a valores aceitáveis, dentro dos limites apropriados e viáveis. Para Albuquerque (2014), na escolha do material a ser empregado na construção da proteção, o projetista deve previamente avaliar, dentre outros, o comportamento dos materiais e dos componentes frente aos vários tipos de energia e ao fluxo de radiações a que serão submetidos. Os aspectos que envolvem desempenho estrutural, a segurança contra incêndio, a segurança no uso e operação, a durabilidade, a manutenção e a adequação ambiental da solução devem ser criteriosamente investigadas para que se consiga solução segura.

2.5 MATERIAIS DE BLINDAGEM

Diversos são os materiais que permitem uso em blindagem, é importante, contudo, que seja utilizada a espessura suficiente para atenuar a intensidade da radiação aos limites autorizados. Gondim (2009) coloca as seguintes características a serem levadas em consideração na escolha do material: espaço físico para a instalação, espessura e peso da barreira, uso múltiplo (blindagem e estrutura), uniformidade e homogeneidade, estabilidade, custo da construção e acabamento,

limpeza e conservação. A seguir, apresentaremos os principais materiais utilizados para blindagem.

2.5.1 Concreto

Geralmente, o concreto comum é escolhido quando o espaço não é a preocupação, considerando ainda, em especial, que tem baixo custo e é de fácil construção. Na concretagem, as ferragens são utilizadas para elevar a resistência e as formas são montadas para moldar o concreto fresco, para dar forma aos elementos. Salieta-se que é necessário que esse procedimento seja realizado de forma contínua e vibratório para evitar fendas e espaços vazios no concreto. Quanto a dosagem, esta requer cautela para que seja garantida a densidade adequada.

Como as espessuras são baseadas em concreto comum de $2,35 \text{ g/cm}^3$, segundo Gondim (2009), qualquer variação na densidade do concreto usado acarreta ajuste na espessura calculada que, se não for muito grande, pode ser feito baseado na razão entre as densidades. Concreto de alta densidade pode ser usado quando o espaço é limitado. Entretanto, seu custo relativamente alto e a falta de curvas de atenuação apropriadas contraindicam sua utilização rotineira. O uso da relação de densidades na correção da espessura superestima a espessura necessária. Caso seja indicado o uso do concreto de alta densidade, deve-se medir ou obter as curvas de atenuação para a energia empregada e usá-las na determinação das espessuras de blindagem.

2.5.2 Aço e Chumbo

Além de poder ser usado como componente estrutural, devido à sua alta resistência, o aço de baixo teor de carbono apresenta características convenientes para blindagem. Placas de aço podem ser usadas complementarmente ao concreto quando o espaço está à prêmio e, também, como marco e blindagem de portas, e, ainda, como preenchimento de recessos nas paredes (GONDIM, 2009).

Quanto ao chumbo, seu uso só é aconselhado como blindagem nas portas, pois, apesar de ser denso, é de difícil manuseio, possui baixa resistência além de ser um material oneroso.

De acordo com Verçosa (1985), as mantas de chumbo utilizadas na proteção radiológica devem ser feitas com o elemento puro, sem impurezas. Elas são laminadas na espessura necessária para proteção das paredes e portas de acordo com a orientação do projeto de radioproteção específico da sala. A espessura necessária é determinada em função de vários fatores, entre eles, o tipo de menores decaimentos, a ocupação das áreas adjacentes, a quantidade de exames realizados e outros.

2.5.3 Argamassa baritada

Também conhecida como massa baritada, a argamassa baritada, composto que agrega um minério de alta densidade “barita” ou sulfato de bário hidratado (BaSO_4), tem como função impedir que os raios primários e secundários saiam do ambiente onde são realizados exames radiodiagnósticos. Os raios devem ser dissipados na própria sala, pois a radiação é nociva à saúde e jamais deve se espalhar pelas adjacências. Além da aplicação nas paredes, piso e/ou teto, também é usada para chumbar a porta radiológica e o visor plumbífero na parede. A argamassa baritada por ser aplicada em paredes de alvenaria, de bloco de gesso e *drywall* (VILSON, 2019).

Devido a sua alta densidade resultante, se comparada à densidade de uma argamassa tradicional, absorve mais radiação (cerca de $3,2 \text{ g/cm}^3$).

2.5.4 Materiais Cerâmicos

Por materiais cerâmicos entendem-se aqueles produtos que, obtidos a partir de substâncias minerais não metálicas, são primeiramente moldados e, em seguida, através de tratamento térmico em temperaturas elevadas tornam-se mecanicamente resistentes (GRANDI; RENÓ, 1989).

No contexto de atenuação da radiação X, o comportamento de placas cerâmicas de grês branco tem resultados satisfatórios de atenuação à radiação X, levando em conta as energias utilizadas em raios X diagnóstico de 80, 100 e 150 kVp (FRIMAIO, 2006).

2.6 A ESCÓRIA DA METALURGIA DA CASSITERITA

No atual cenário internacional, o Brasil, outrora líder do mercado, ocupa hoje o 5º lugar no rol dos produtores mundiais na produção de cassiterita.

A trajetória da produção brasileira de estanho contido em cassiterita, com o destaque dos eventos que influenciaram o desempenho do setor, está retratada na Figura 2, conforme dados do SNIEE (2009):

Figura 2 – Produção Brasileira de Cassiterita (t de Sn contido)

Ano	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
t	3.180	2.020	2.510	3.210	3.140	3.998	4.735	5.525	6.130	6.950
Ano	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
t	6.742	7.306	8.574	13.061	19.932	26.451	27.690	28.485	42.473	54.708
Ano	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	2000
t	41.913	30.555	27.558	27.871	19.641	19.360	20.567	19.064	14.607	13.773
Ano	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
t	13.048	11.584	12.083	12.467	11.035	9.265	11.835	12.992	-	-

Fonte: (SNIEE, 2009).

2.6.1 Escória de Metalurgia

Pela natureza de suas operações, a exploração mineral é uma atividade impactante ao meio ambiente. A escória é o subproduto da fundição de minério para purificar metais. Pode ser considerada uma mistura de óxidos metálicos, mas, também, podem conter sulfitos metálicos e átomos de metais na sua forma elementar.

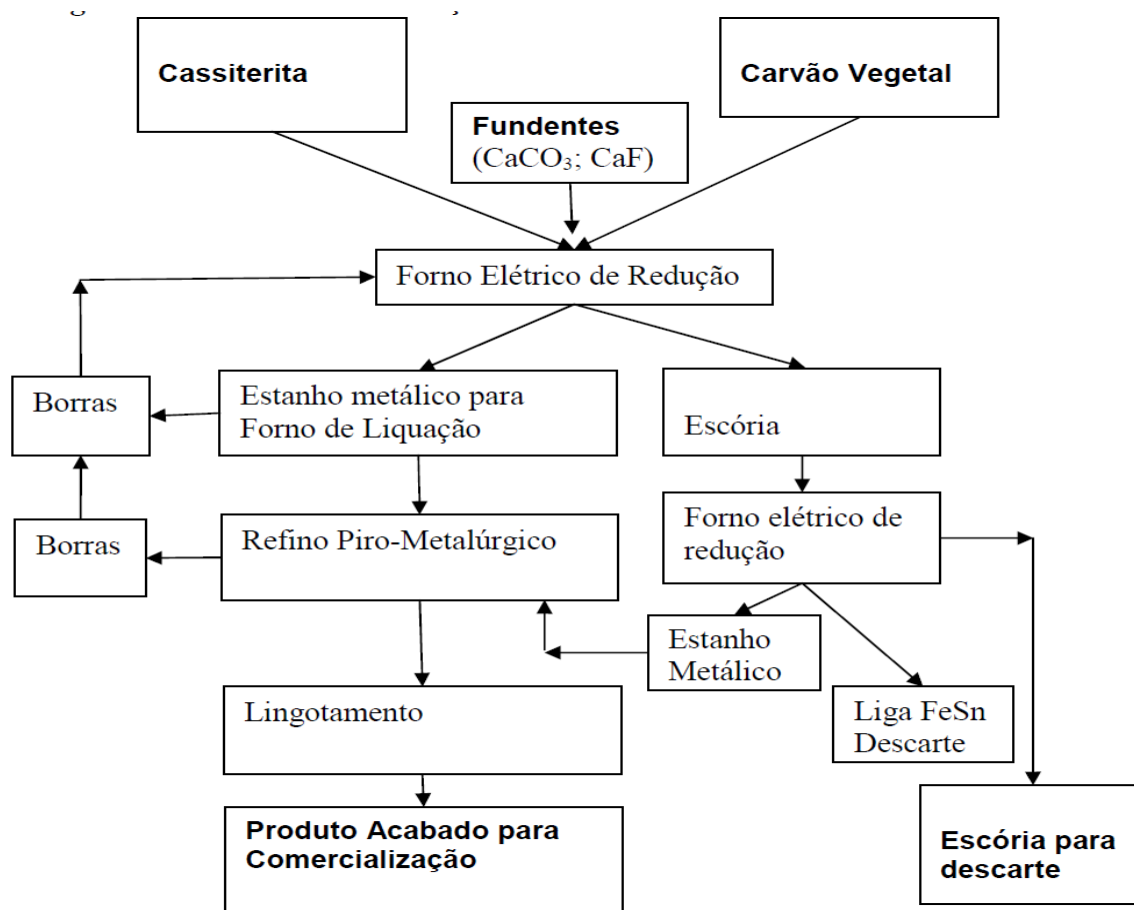
As escórias são geralmente usadas como maneira de remover impurezas na fundição de metal. No entanto, devido à sua constituição, também podem cumprir outras funções, tais como, assistir no controle de temperaturas de fusão e na minimização da reoxidação do produto.

A escória possui várias aplicações comerciais. Este material é reprocessado e utilizado como subproduto de cimentos, fertilizantes, lastro de ferrovias, além de também ser utilizado na construção civil como material de aterro para pavimentações.

2.6.2 Escória da Cassiterita

O processamento metalúrgico de redução e refino da cassiterita gera a escória, que é estocada a céu aberto. Conforme Ministério de Minas e Energia (MME) e Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento (BIRD) (2009), a quantidade dessa escória rejeito atualmente estocada é estimada em 600 mil toneladas. O processamento da cassiterita é realizado de acordo com o Fluxograma 1.

Fluxograma 1 – Fluxograma do Processo de Redução e Refino da Cassiterita em Forno Elétrico



Fonte: (MME; BIRD, 2009).

2.6.3 A escória da metalurgia da cassiterita e meio ambiente

No âmbito ambiental, observa-se a necessidade da aplicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, uma vez que a escória de cassiterita é descartada a

céu aberto, conforme Foto 1. A este material não é dado nenhum tratamento específico ou aplicação para reutilização.

Foto 1 –Escória da metalurgia da cassiterita depositada a céu aberto



Fonte: Acervo do autor.

É importante lembrar que, dentre os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei nº 12.305/2010 ressalta-se:

[...]

II - não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;

[...]

VI - incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;

[...]

VII - gestão integrada de resíduos sólidos;

VIII - articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;

IX - capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos;

[...]

XIV - incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;

[...] (BRASIL, 2010).

Por fim, é preciso considerar que as empresas, na busca em atender um mercado cada vez mais exigente e competitivo, devem oferecer produtos de alta qualidade e baixo custo de produção. Além da crescente preocupação ambiental, que tem motivado o desenvolvimento de processos capazes de gerar menor volume de resíduos, bem como estudo de processos produtivos capazes de tratar resíduos industriais, que podem ser fontes de novos produtos, com elevado valor econômico e aplicação tecnológica.

3 METODOLOGIA

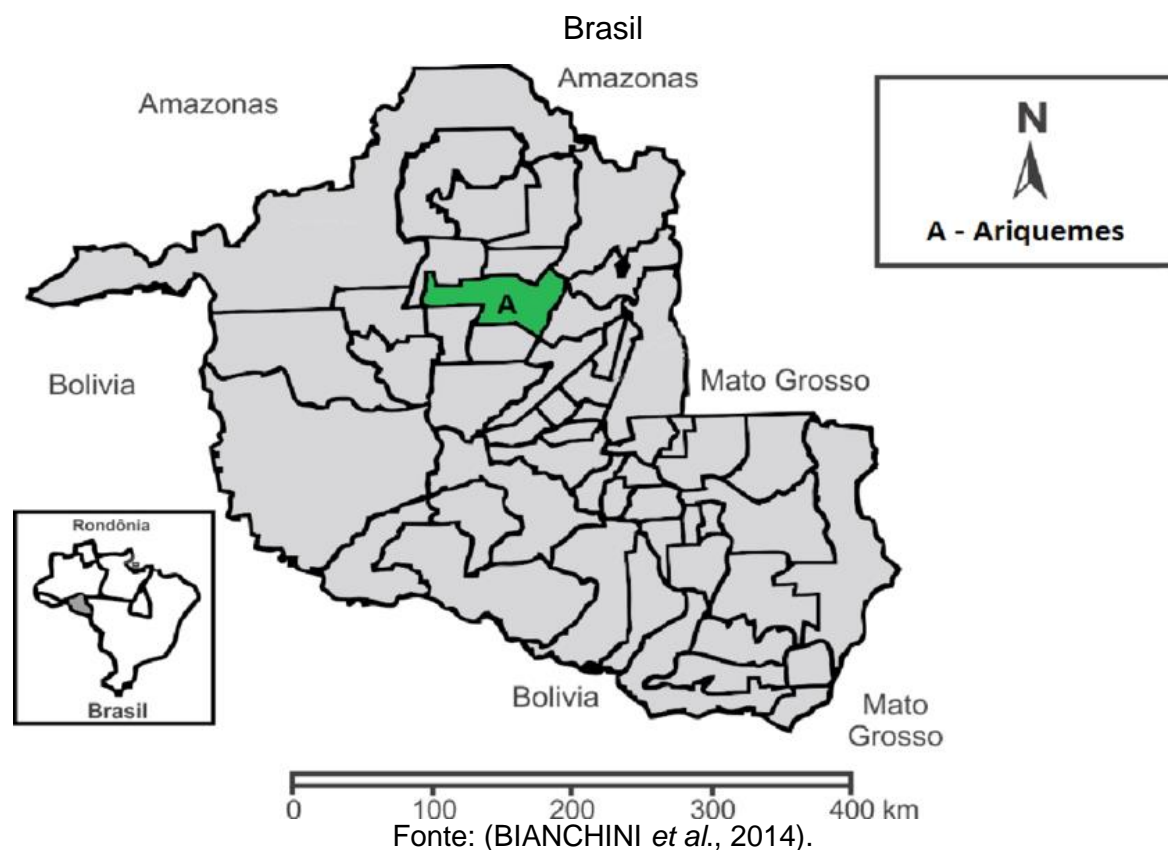
Nesta seção será detalhada o material selecionado para realização deste estudo e todo o método experimental utilizado neste processo. O estudo foi dividido em quatro partes. A primeira parte compreende a descrição do material e a metodologia para a coleta da escória da metalurgia da cassiterita. Na segunda parte foi apresentado a caracterização física da escória, os métodos necessários para realizar os ensaios propostos. Já na terceira parte do trabalho foram confeccionados os traços de argamassa de revestimento. Foram demonstrados os materiais e métodos utilizados para confecção destes traços. Nesta fase também foram moldados os corpos de prova necessários para realizar o experimento da fase seguinte do projeto. Por último, após a terceira parte concluída, realizamos os testes nos corpos de prova para a determinação experimental dos coeficientes de atenuação da argamassa.

3.1 COLETA DA ESCÓRIA DA METALURGIA DA CASSITERITA

3.1.1 Material

A escória utilizada neste trabalho foi proveniente de uma empresa de redução de minério de cassiterita localizada no município de Ariquemes (Mapa 1), cidade que se encontra localizada no estado de Rondônia, a 199 km da capital, Porto Velho, região norte do Brasil, sua área geográfica é de 4.426,57 km², com população de aproximadamente 90.353 habitantes (IBGE, 2021).

Mapa 1 – Mapa de localização do Município de Ariquemes no estado de Rondônia,



3.1.2 Método

A amostra de campo é formada reunindo-se várias amostras parciais em número suficiente para os ensaios de laboratório. Esta amostra é a porção representativa de um lote de agregados, coletada nas condições prescritas pela ABNT (2009) (Agregados Amostragem), seja na fonte de produção, armazenamento ou transporte.

3.1.2.1 Amostragem

De acordo com a ABNT (2009), a amostragem é tão importante quanto o ensaio, por isso, devem ser tomadas todas as precauções necessárias para que se obtenha amostras representativas quanto às suas natureza e características.

A escória da metalurgia da cassiterita encontra-se em pilhas no pátio da mineradora (Foto 2) e, conforme preconiza a referida ABNT (2009), nas pilhas de amostragem de agregado miúdo, a camada exterior que estiver sujeita à segregação

deve ser removida (de aproximadamente 30 cm ou mais) e a amostra deve ser coletada abaixo dessa camada.

Foto 2 – Escória da metalurgia da cassiterita



Fonte: Acervo do autor.

Para a quantidade de amostra de campo coletada nos valem das especificações contidas em (ABNT, 2009) (Quadro 1):

Quadro 1 – Quantidade de amostras a serem coletadas para ensaios físicos ou químicos

Tamaño nominal del agregado/ <i>Tamanho nominal do agregado</i>	Número mínimo de muestras parciales/ <i>Número mínimo de amostras parciais</i>	Cantidad total de muestra de campo (mínimo)/ <i>Quantidade total da amostra de campo (mínimo)</i>	
		En masa/ <i>Em massa (kg)</i>	En volumen/ <i>Em volume (dm³)</i>
≤ 9,5 mm	3	25	40
> 9,5 mm ≤ 19 mm		25	40
> 19 mm ≤ 37,5 mm		50	75
> 37,5 mm ≤ 75 mm		100	150
> 75 mm ≤ 125 mm		150	225

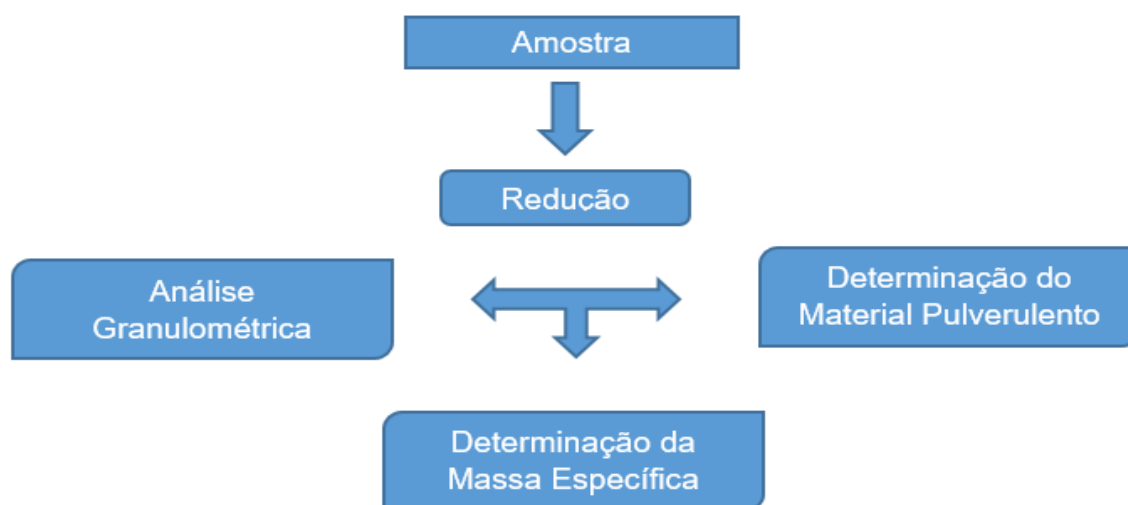
NOTAS:
 1) Las masas o volúmenes considerados se refieren a agregados de densidad entre 2 g/cm³ y 3 g/cm³. La cantidad total de muestra de campo, en volumen, tiene en cuenta criterios prácticos usuales. / *As massas ou volumes considerados referem-se a agregados de massa específica entre 2 g/cm³ e 3 g/cm³. A quantidade total de amostra de campo, em volume, leva em conta critérios práticos usuais.*
 2) Para agregados de dimensiones superiores a 75 mm, la cantidad mínima de muestra de campo se debe fijar para cada caso específico, tomando, por lo menos, veinte muestras parciales. / *Para agregados de dimensões superiores a 75 mm, a quantidade mínima de amostra de campo deve ser fixada para cada caso específico, tomando, pelo menos, vinte amostras parciais.*

Fonte: (ABNT, 2009).

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA NO LABORATÓRIO

Os ensaios iniciais de caracterização foram realizados na escória coletada para desenvolvimento deste trabalho, de acordo com o Esquema 1. Inicialmente, as amostras foram preparadas seguindo métodos específicos, conforme descrito em cada ensaio e reproduzido neste trabalho.

Esquema 1 – Ensaios de caracterização a ser realizado na amostra



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os ensaios de caracterização listados anteriormente são necessários para o cálculo e análise inicial para produção da argamassa de revestimento, um dos objetivos deste trabalho.

3.2.1 Material

O material utilizado nestes ensaios é a escória da metalurgia da cassiterita.

3.2.2 Método

3.2.2.1 Redução da Amostra

De acordo com a ABNT (2001), as especificações para agregados requerem amostra cuja quantidade seja apropriada para a execução dos ensaios a que se

destina. Amostras maiores tendem a ser mais representativas do material total. Os procedimentos estabelecem a redução das grandes amostras de campo a um tamanho adequado para ensaios de laboratório, de maneira que a amostra seja a mais representativa possível da amostra de campo.

Foi utilizado o método “A” (ABNT, 2001), que prevê a utilização do separador mecânico para tal procedimento. Na Foto 3 podemos verificar a amostra já reduzida.

Foto 3 – Amostra da escória reduzida no laboratório



Fonte: Acervo do autor.

3.2.2.2 Análise Granulométrica

A granulometria é a proporção relativa, em porcentagem, dos diferentes tamanhos dos grãos que constituem o agregado. A composição granulométrica tem grande influência nas propriedades das argamassas e concretos. Foram formadas duas amostras conforme preconiza a ABNT (2003a), antes de formar estas amostras, elas foram umedecidas para evitar segregação e cuidadosamente misturada. Logo após, secas em estufas e resfriadas em temperatura ambiente.

A massa mínima para o ensaio é indicada no Quadro 2.

Quadro 2 – Massa mínima, por amostra de ensaio

Dimensión máxima nominal del agregado / <i>Dimensão máxima nominal do agregado</i> mm	Masa mínima de la muestra de ensayo / <i>Massa mínima da amostra de ensaio</i> kg
< 4,75	0,3*
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

(*) Después del secado. / *Após secagem.*

Fonte: (ABNT, 2003a).

Inicialmente, o conjunto de peneiras (Foto 4) com a amostra foi colocado no agitador mecânico para se permitir a separação e classificação prévia do material.

Foto 4 – Ensaio de granulometria

Fonte: Acervo do autor.

Posteriormente, foi necessário destacar e agitar manualmente a peneira superior do conjunto (com tampa e fundo falso encaixados) até que, após um minuto

de agitação contínua, a massa de material passante pela peneira seja inferior a 1% da massa do material retido. Por fim, foi separado o material de cada peneira e pesado. Este mesmo procedimento foi repetido mais uma vez. Para obtermos o resultado, calculamos a média das duas amostras.

3.2.2.3 Determinação da Massa Específica

O ensaio é determinado pela ABNT (2003b) (Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente).

Massa específica: É a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Para o cálculo da massa específica aparente do agregado seco é utilizado a fórmula:

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (12)$$

Onde:

- d_1 , é a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;
- m , é a massa da amostra seca em estufa, determinada segundo 7.3, em gramas (ABNT, 2003b);
- V , é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;
- V_a , é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a seguinte fórmula, em centímetros cúbicos:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (13)$$

Onde:

- m_1 , é a massa do conjunto (frasco + agregado) determinada de acordo com 7.1, em gramas (ABNT, 2003b);

- m_2 , é a massa total (frasco + agregado + água) determinada de acordo com 7.2, em gramas (ABNT, 2003b);
- ρ_a , é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

Para o cálculo da massa específica do agregado saturada superfície seca utiliza-se a seguinte forma:

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (14)$$

Onde:

- d_2 , é a massa específica do agregado saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico;
- m_s , é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, determinada em 7.1, em gramas (ABNT, 2003b);
- V , é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;
- V_a , é o volume de água adicionada ao frasco, determinado segundo 8.1, em centímetros cúbicos (ABNT, 2003b).

Para calcular a massa específica utilizamos a fórmula:

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (15)$$

Onde:

- d_3 , é a massa específica do agregado, em gramas por centímetros cúbicos;
- m , é a massa da amostra seca em estufa, determinada segundo 7.3, em gramas (ABNT, 2003b);
- V , é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;
- V_a , é o volume de água adicionado ao frasco, determinado segundo 8.1, em centímetros cúbicos (ABNT, 2003b);

- m_s , é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, determinada em 7.1, em gramas (ABNT, 2003b);
- ρ_a , é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

3.2.2.4 Determinação do Material Pulverulento

Conforme a ABNT (2003c), materiais pulverulentos são partículas minerais com dimensão inferior a 0,075 mm, inclusive os materiais solúveis em água, presentes nos agregados.

Os materiais pulverulentos em alto teor diminuem a aderência do agregado a pasta ou argamassa, prejudicando de forma direta a resistência mecânica e a trabalhabilidade do concreto.

A fórmula seguinte serve para calcular a quantidade de material que passa pela peneira 75 mm por lavagem:

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (16)$$

Onde:

- m , é a porcentagem de material mais fino que a peneira de 75 mm por lavagem;
- m_i , é a massa original da amostra seca; em gramas;
- m_f , é a massa da amostra seca após a lavagem, em gramas.

3.3 CONFECÇÃO DOS TRAÇOS DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

3.3.1 Materiais

Nesta etapa foram confeccionados os traços de argamassa de revestimento. Além da utilização da escória da metalurgia da cassiterita, utilizamos também outros dois materiais:

- Cimento Portland Pozolânico – CPIV: aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de Clinquer Portland e materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou separado (ABNT, 1991).
- Cal hidrata: pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou, ainda, de mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio (ABNT, 2003d).

3.3.2 Método

3.3.2.1 Confeção da Argamassa de Revestimento

Após a caracterização básica da escória da metalurgia da cassiterita, foram adotados os procedimentos descritos na ABNT (2016) (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para realização de ensaios) para confeção dos traços. Os experimentos iniciais (Fotos 5 e 6) foram executados no preparo da mistura para confeção das argamassas no intuito de verificar qual proporção de água em relação aos materiais empregados seria a mais adequada para se ter uma mistura homogênea com o agregado de escória da metalurgia da cassiterita.

Foto 5 – Testes experimentais da argamassa



Fonte: Acervo do autor.

Foto 6 – Confeção dos traços de argamassa com agregado miúdo da escória da metalurgia da cassiterita



Fonte: Acervo do autor.

Foram confeccionados vários traços de argamassa (cimento, cal hidratada, escória da metalurgia e água) na tentativa de obter a melhor trabalhabilidade.

3.3.2.2 Determinação do Índice de Consistência

O estudo da determinação do índice de consistência das argamassas é importante para melhor compreensão das propriedades do cimento de acordo com a mistura de água e seus agregados. A argamassa (simples mistura de cimento, água e agregados) é misturada em proporções que conduzem a uma consistência ideal.

A ABNT (2016) (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência), estabelece os critérios para realização deste ensaio. Na Foto 7 mostramos a argamassa na mesa de espalhamento com a realização da medida da consistência.

Foto 7 – Determinação do índice de consistência. Argamassa produzida com escória da metalurgia da cassiterita



Fonte: Acervo do autor.

Utilizamos o traço de argamassa usual para revestimento interno na proporção 1:2:8 (sendo uma parte de cimento, duas partes de cal e oito partes de escória), pois foi o que demonstrou melhor consistência. Nestes casos conforme preconizado pela NBR 13276, quando não há informações quanto à quantidade de água da mistura da argamassa, adota-se o índice de consistência (260 ± 5) mm.

3.3.2.3 Moldagem dos corpos de prova

Posterior ao ensaio de consistência, foram confeccionados novos traços de argamassas na proporção encontrada entre os materiais e a água para a moldagem dos corpos de prova (Foto 8).

Foto 8 – Moldagem dos corpos de prova da argamassa



Fonte: Acervo do autor.

Foi introduzido diretamente em cada molde uma proporção de argamassa, formando uma camada única e uniforme. O molde foi posicionado na mesa de adensamento e aplicadas 30 quedas. Os corpos de prova foram rasados com uma

régua metálica. Foram moldados seis corpos de prova quadrados com 15 centímetros de lado e com as seguintes espessuras: 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm e 50mm (Foto 9).

Foto 9 – Corpos de prova da argamassa produzida com agregado miúdo de escória da metalurgia da cassiterita



Fonte: Acervo do autor.

Os corpos de prova permaneceram 48 horas nos moldes e, posteriormente, ficaram submersos em água até a data dos testes para determinação dos coeficientes de atenuação da argamassa.

3.4 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DA ARGAMASSA

3.4.1 Equipamentos

Esta é a última etapa do trabalho. Após a confecção dos corpos de prova no laboratório de materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), as amostras foram transportadas para o laboratório do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) a fim de realizar os ensaios e verificar o grau de atenuação das amostras.

3.4.1.1 Detector HPG e módulos eletrônicos

Durante as medidas, a detecção dos raios Gama é feita com um detector HPGe (germânio hiperpuro) em conjunto com módulos eletrônicos associados, pois este possui melhor resolução que um detector cintilador.

O detector HPGe (Foto 10) utilizado, fabricado pela EG&G ORTEC (modelo GEM-25185-P-Plus), possui um cristal de 130 cm³ com resolução de 1,71 keV e uma eficiência relativa de 26,1% para o raio Gama de 1332,5 keV do ⁶⁰Co. Os módulos eletrônicos utilizados foram:

- Fonte de alta tensão EG&G ORTEC, modelo 659;
- Analisador multicanal Spectmm Master EG&G ORTEC, modelo 921;
- Amplificador Ultra High Rate Amplifier EG&G ORTEC, modelo 973U;
- Bin EG&G ORTEC, modelo 4001C;
- Microcomputador para aquisição e armazenagem de espectros Gama.

A aquisição dos espectros Gama é efetuada com o analisador multicanal acoplado ao microcomputador através de interface de controle.

Foto 10 – Detector HPGe



Fonte: Acervo do autor.

3.4.1.2 Fonte de ^{137}Cs

O fluxo de raios Gama proveniente da fonte de ^{137}Cs utilizada é de tal intensidade que ela se encontra totalmente confinada dentro de espessa blindagem de urânio depletado (Foto 11).

Esta blindagem possui, na parte traseira, uma alavanca, que permanece travada por um cadeado e, na parte frontal, um orifício central profundo, selado tanto pela própria blindagem quanto por uma pequena tampa de chumbo. Para expor a fonte de ^{137}Cs é necessário abrir o orifício circular frontal, obtendo a partir do mesmo um feixe de raios-gama altamente colimado e bastante intenso, através do seguinte procedimento: remover a tampa de chumbo, abrir o cadeado e girar a alavanca até o fim no sentido horário. Em razão destas circunstâncias, todo o trabalho efetuado com esta fonte foi cercado de cuidados especiais e monitorado constantemente por técnicos de proteção radiológica (ZEITUNI, 1998, p. 35-36).

Foto 11 – Fonte de ^{137}Cs

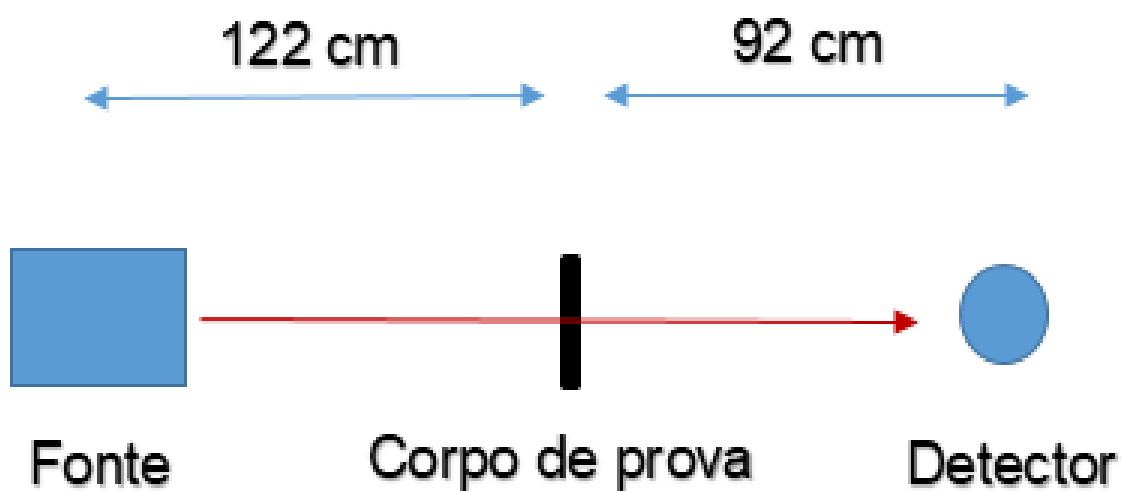


Fonte: Acervo do autor.

3.4.2 Método

Foi montado aparato experimental para efetuar as leituras de atenuação. Este aparato consiste basicamente no posicionamento da fonte de ^{137}Cs . Após este posicionamento foi necessário garantir que o orifício circular central da fonte estivesse alinhado com o centro da janela do detector HPGe. Esta centralidade foi realizada com o auxílio de um feixe de laser. Finalizada a montagem do aparato, a distância entre a fonte e o detector foi de aproximadamente 215 centímetros. No Esquema 2 e nas Fotos 12 e 13 temos a demonstração do aparato com os respectivos detalhes.

Esquema 2 – Desenho esquemático: distância entre a fonte, corpo de prova e detector



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foto 12 – Aparato experimental: fonte, corpo de prova e detector



Fonte: Acervo do autor.

Foto 13 – Aparato experimental para as leituras de atenuação – detalhe



Fonte: Acervo do autor.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA NO LABORATÓRIO

Inicialmente, analisamos os resultados das características físicas da escória da metalurgia da cassiterita.

4.1.1 Análise Granulométrica

Na classificação quanto às dimensões do agregado, no ensaio de determinação da composição granulométrica, o material se enquadra nos limites superiores entre a zona ótima e zona utilizável. No Quadro 3 temos o resultado do ensaio e no Quadro 4 são identificadas as faixas da composição granulométrica.

Quadro 3 – Análise de Agregados

ANÁLISE DE AGREGADOS								
Amostra : Escória da Metalurgia da Cassiterita - Fundição / Mineradora de Arique mes								
Característica da Amostra	Material		Gradação		Procedência		Dia da Coleta	
	Escória		-		Arique mes / RO		10/04/2019	
GRANULOMETRIA			M1=	999,4 gramas		M2=	999,2 gramas	
Peneiras (mm)	Material Retido (g)		Porcentagem Retida (%)			Porcentagem acumulada (%)	ENSAIOS FÍSICOS	
	M1	M2	M1	M2	Média		Massa específica (s)	2,99 g/cm ³
4.8	0,0	0,0	0,00	0,00	0,0	0,0		
2.4	46,0	42,3	4,60	4,23	4,4	4,4		
1.2	333,3	361,5	33,35	36,18	34,8	39,2	Material Pulverulento	2,26%
0.6	301,8	260,5	30,20	26,07	28,1	67,3		
0.3	194,6	202,2	19,47	20,24	19,9	87,2		
0.15	75,3	79,5	7,53	7,95	7,7	94,9		
Fundo	48,4	53,2	4,84	5,32	5,1	100		
Módulo de Finura: 2,93				Dimensão Máxima: 2,4 mm				

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4 – Porcentagens da Granulometria do Agregado Miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTAS

1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: (ABNT, 2005).

4.1.2 Determinação da Massa Específica

Na classificação quanto à massa, a escória da metalurgia da cassiterita no ensaio de determinação da massa específica e massa específica aparente obteve massa específica de 2,99 g/cm³ (Quadro 3).

4.1.3 Determinação do Material Pulverulento

O ensaio de determinação do material fino que passa através da peneira 0,075mm, por lavagem, também mostrou resultado satisfatório. Segundo ABNT (2005), preconiza-se limite de material pulverulento de 5,0%. O resultado da escória da metalurgia da cassiterita foi de 2,26%.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA NO LABORATÓRIO

4.2.1 Determinação do Índice de Consistência

A consistência da argamassa, medida através do ensaio – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência (ABNT, 2016), obteve resultado na mesa de espalhamento de 265 mm.

Este valor está dentro dos parâmetros estabelecidos em ABNT NBR 13276 (2016), que menciona para casos como a argamassa produzida neste trabalho um valor de consistência de $260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$.

4.3 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DA ARGAMASSA

Por fim, foram realizadas as leituras de atenuação na amostra a partir do aparato experimental feito em laboratório. Foram realizados cinco testes em cada uma das seis amostras. O Quadro 5 mostra o resultado de cada um dos testes.

Quadro 5 – Testes de blindagem – Leituras de atenuação

Teste 1				Teste 2			
Amostras	Espessura (mm)	Contagem	Varição (±)	Amostras	Espessura (mm)	Contagem	Varição (±)
Sem blindagem		4147	8	Sem blindagem		4105	8
1	10	3504	8	1	10	3441	8
2	15	3226	7	2	15	3236	7
3	20	3025	7	3	20	3021	7
4	25	2844	7	4	25	2854	7
5	30	2621	7	5	30	2580	7
6	50	2007	6	6	50	2036	6

Teste 3				Teste 4			
Amostras	Espessura (mm)	Contagem	Varição (±)	Amostras	Espessura (mm)	Contagem	Varição (±)
Sem blindagem		4145	8	Sem blindagem		4127	8
1	10	3469	8	1	10	3483	8
2	15	3223	7	2	15	3210	7
3	20	3037	7	3	20	3064	7
4	25	2839	7	4	25	2810	7
5	30	2609	7	5	30	2598	7
6	50	2037	6	6	50	2029	6

Teste 5				Média das Medições			
Amostras	Espessura (mm)	Contagem	Varição (±)	Amostras	Espessura (mm)	Contagem	Varição (±)
Sem blindagem		4112	8	Sem blindagem		4127	8
1	10	3456	8	1	10	3471	8
2	15	3195	7	2	15	3218	7
3	20	3048	7	3	20	3039	7
4	25	2831	7	4	25	2836	7
5	30	2599	7	5	30	2601	7
6	50	2009	6	6	50	2024	6

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 1 demonstra o compilado dos resultados com a blindagem média em porcentagem.

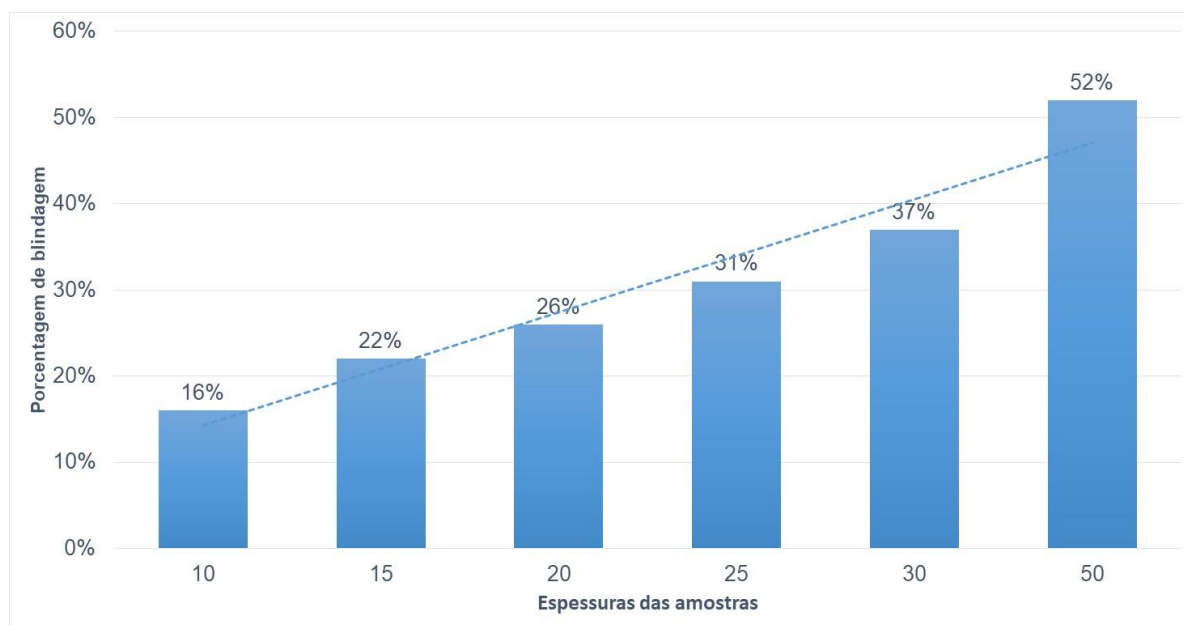
Tabela 1 – Blindagem média

Amostras	Espessura (mm)	Blindagem Média (%)
1	10	16%
2	15	22%
3	20	26%
4	25	31%
5	30	37%
6	50	52%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para melhor detalhamento, no Gráfico 1 mostramos que os resultados foram lineares.

Gráfico 1 – Resultado do ensaio de Blindagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 DISCUSSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção vamos analisar os resultados obtidos e as possibilidades que teremos a partir desta pesquisa. Esta análise foi fundamentada primeiramente no material – Escória da metalurgia da cassiterita, depois analisamos a argamassa produzida a partir desta escória e, por fim, discorreremos sobre as amostras produzidas e a performance de blindagem deste material a partir do experimento.

5.1 O MATERIAL: ESCÓRIA DA METALURGIA DA CASSITERITA

A base deste estudo é a escória da metalurgia da cassiterita. Os ensaios que foram realizados para caracterizá-lo fisicamente foram todos promissores. A granulometria ficou dentro do aceitável. Vale destacar que o material não passou por nenhum tipo de cominuição, ou seja, o material foi retirado *in natura* e não precisou de nenhuma interferência para diminuir o tamanho dos grãos ou corrigir algum tipo de lacuna na curva granulométrica. Apenas foi realizado o quarteamento simples da amostra e, logo depois, foi ensaiada. No que diz respeito ao material pulverulento, o resultado da escória também foi satisfatório. O excesso de pulverulento pode tornar a massa da mistura antieconômica, pois cria a necessidade na argamassa ou concreto de se fazer a adição de água e, conseqüentemente, mais cimento para garantir o mesmo fator água/cimento. Neste quesito, o material analisado não necessita de nenhuma ação direta para corrigir e diminuir o pulverulento. Outro ponto positivo da escória é sua massa específica. No ensaio realizado no laboratório, este material obteve o resultado de 2,99 g/cm³. Resultado também satisfatório. Ter massa específica desta ordem nos ajudou a desenvolver a última etapa deste trabalho, que é a blindagem para radiação.

Para trabalhos futuros, a partir da provocação deste trabalho é possível o aprofundamento de pesquisas com este material, não só no aspecto físico, bem como um estudo da composição química da escória para uso como argamassa de blindagem.

5.2 A ARGAMASSA COM ESCÓRIA DA METALURGIA DA CASSITERITA

Nesta fase do experimento, a argamassa com escória se comportou bem. Não foi necessário, inicialmente, nenhum tipo de aditivo para melhorar a trabalhabilidade da amostra. A composição da mistura foi bem econômica, pois foram utilizados apenas materiais básicos como cimento e cal hidratada para confecção da argamassa.

Neste estudo não foi realizado nenhum tipo de ensaio na massa fresca da argamassa. Desta forma também podemos desdobrar em pesquisas futuras o aprofundamento do estudo da argamassa e entender o comportamento desta composição na utilização como blindagem.

5.3 AS AMOSTRAS E A PERFORMANCE PARA BLINDAGEM

As amostras após endurecidas foram diretamente para o teste de blindagem. Nos testes, o resultado também foi promissor. O material blindou a partir de amostra com espessura de cinco centímetros, aproximadamente 50% da radiação.

Para trabalhos futuros aqui também se abrem dois campos de estudos para aprofundamento das análises: o primeiro diz respeito à argamassa no estado endurecido. Esta análise não é objeto deste trabalho, entretanto, para melhor conhecimento do comportamento deste material no estado endurecido é necessário um estudo criterioso desta argamassa. Por fim, abre-se a perspectiva para a realização de outros estudos de blindagem a fim de verificar o comportamento desta argamassa em vários ambientes.

6 CONCLUSÃO

A proposição deste trabalho era analisar a possibilidade de utilização da escória da metalurgia da cassiterita como agregado miúdo para a produção de argamassas de revestimento na blindagem de raios X e raios Gama. A partir dos estudos realizados não podemos afirmar que é possível esta utilização, entretanto, com aprofundamento das pesquisas tanto no material em si – escória da metalurgia da cassiterita, quanto no estudo da argamassa no estado fresco e no estado endurecido, bem como este mesmo aprofundamento nos experimentos de blindagem, talvez tenhamos resposta mais assertiva sobre o questionamento inicial.

O que é inconteste neste trabalho é a demonstração da potencialidade do material para o que se propõe na pesquisa e a sua contribuição para a possibilidade de novas pesquisas. As escórias de metalurgia são amplamente aproveitadas por várias indústrias no mundo todo. Talvez, a partir do aprofundamento dos estudos sugeridos neste trabalho, possamos fazer com que a escória da metalurgia da cassiterita tenha seu aproveitamento solidificado como agregado miúdo para a produção de argamassas de revestimento na blindagem de raios X e raios Gama.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, S. M. **Estudo para o desenvolvimento e caracterização de concretos de massa específica elevada para proteção às radiações gama e x.** Orientador: Gian-Maria Agostino Angelo Sordi. São Paulo, 2014. 156 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-06102014-090452/en.php>. Acesso em: 10 jan. 2021.

ARCHER, B. R.; WAGNER, L. K. Determination of Diagnostic X-ray Spectra with Characteristics Radiation using Attenuation Analysis. **Medical Physics**, v. 15, n. 4, p. 637-641, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1118/1.596220>. Acesso em: 10 jan. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação do material fino que passa através da peneira 0,075mm, por lavagem:** procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **ABNT NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **ABNT NBR 16541:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **ABNT NBR 5736:** Cimento Portland Pozolânico: especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **ABNT NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **ABNT NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **ABNT NBR NM 26:** agregados – Amostragem: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **ABNT NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios em laboratório: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **ABNT NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 0,075 μm , por lavagem: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **ABNT NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248:** agregados – Determinação da Composição Granulométrica: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

ATTIX, F. H. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry.** London: John Willey & Sons, 1986.

BIANCHINI, K.; BRONDANI, F. M. M.; MENEGUETTI, N. F. S. P.; MENEGUETTI, D. U. O.; ZAN, R. A. Gestão da análise de resíduos presentes na água gerada da lavagem dos gases oriundos do processo de redução da cassiterita a estanho em alto-fornos, em uma empresa minerometalúrgica do município de Ariquemes, Rondônia. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, RS, v. 13, n. 2, p. 3011-3018, 2014. DOI: 10.5902/2236130810394. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/10394>. Acesso em: 15 jan. 2021.

BIRCH, R.; MARSHALL, M.; Computation of Bremsstrahlung x-ray spectra and comparison with spectra measured with Ge (Li) detector. **Physics in Medicine and Biology**, v. 24, n. 3, p. 505-517, 1979. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/24/3/002/meta>. Acesso em: 18 jan. 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 18 jan. 2021.

CESAREO, R. *et al.* Interaction of KeV photons with matter and new applications. **Physics Reports**, v. 213, n. 3, p. 117-178, 1992. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(92\)90086-F](https://doi.org/10.1016/0370-1573(92)90086-F). Acesso em: 19 jan. 2021.

COSTA, P. R. **Interação da Radiação γ com a Matéria.** São Paulo: IFUSP, 2011. Disponível em: https://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/Apostila_interacao_da_radiacao_com_a_materia_L.pdf. Acesso em: 15 jan. 2021.

COSTA, P. R. **Modelo para determinação de espessuras de barreiras protetoras em salas para radiologia diagnóstica.** São Paulo. Orientadora: Linda V. E. Caldas. 1999. 143 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Paulo%20Roberto%20Costa_D.pdf. Acesso em: 17 jan. 2021.

CULLITY, D. B.; STOCK, S. R. **Elements of X-ray diffraction.** 3. ed. New York: Prentice-Hall, 2001.
EVANS, R. D. **The atomic Nucleus.** USA: Robert E. Krieger Publishing Company, 1982.

FRIMAIO, A. **Desenvolvimento de um material Cerâmico para utilização em proteção Radiológica Diagnóstica.** Orientadora: Leticia Lucente Campos

Rodrigues. São Paulo, 2006. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Audrew%20Frimaio_M.pdf. Acesso em: 18 jul. 2021.

GONDIM, P. C. A. **Desenvolvimento de bloco de vedação com barita na composição de partida para blindagem da radiação**. Orientador: Uílame Umbelino Gomes. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2009. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/794/Desenvolvimento%20de%20bloco%20de%20veda%c3%a7%c3%a3o%20com%20barita%20na.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 jul. 2021.

GRANDI, A.; RENÓ, R. Revestimento em Cerâmica. CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 33., maio de 1989, Serra Negra. **Anais [...]**. Serra Negra, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [IBGE]. **IBGE Brasil/Panoramas** – Ariquemes. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ro/ariquemes/panorama>. Acesso em: 20 jul. 2021.

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA [IRD]. **Curso Básico de Proteção Radiológica em Radiodiagnóstico**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1999.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION [ICRP]. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. New York: Pergamon Press, New York, 1990.

JONHS, H. E.; CUNNINGHAM, J. R. **The physics of radiology**. 3. ed. Illinois,: Charles C. Thomas, 1974.

KLEVENHAGEN, S. C. **Physics and dosimetry of therapy electron beams**. Madison: Medical Physics, 1993.

KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**. New York, N.Y.: Willey, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA [MME]. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. BANCO INTERNACIONAL PARA A RECONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO [BIRD]. **Relatório Técnico 04: Evolução do mercado mineral no Brasil a longo prazo**. Brasília, DF: MME/BIRD, 2009. (Produto 01, A economia brasileira e mundial; o setor mineral brasileiro e mundial e suas perspectivas de evolução a longo prazo). Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/relatorios-de-apoio-ao-pnm-2030-projeto-estal-1/estudos-sobre-economia-e-o-setor-mineral-brasileiro/documentos/relatorio-ndeg5_evolucao-do-mercado-mineral-mundial-a-longo-prazo.doc. Acesso em: 20 jul. 2021.

PEREIRA, F. A. **Padronização do Método de Dosimetria Retrospectiva Empregando a Técnica de Ressonância Paramagnética Eletrônica e**

Hidroxiapatita. Orientadora: Leticia L. C. Rodrigues. 2005. 576 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2005. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/11289/10888.pdf?sequence=1>. Acesso em: 22 jul. 2021.

SCAFF, L. A. M. **Física da Radioterapia**. São Paulo, SP: SAVIER, 1997.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA EXTRAÇÃO DO ESTANHO [SNIEE]. Informativo do Setor do Estanho. Rio de Janeiro. 2009. Arquivos.

TUCKER, D. M.; BARNES, G. T.; CHAKRABORTYM D. P. Semiempirical Model for generating Tungsten Target X-ray Spectra. **Medical Physics**, v. 18, n. 2, p. 211-218, 1991. Disponível em: <https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1118/1.596709>. Acesso em: 22 jul. 2021.

VERÇOSA, E. J. **Materiais de Construção**. Porto Alegre: PUC-EMA, 1985.

VILSON Proteção Radiológica. **Argamassa Baritada**. Mairiporã, SP: Vilson, 2019. Disponível em: <https://www.vilsonprotecaoradiologica.com.br/argamassa-baritada>. Acesso em: 24 jan. 2021.

WOOTON, R. **Radiation protection of patients**. New York, USA: Cambridge University Press, 1993.

ZEITUNI, C. A. **Espectrometria Gama em Elementos Combustíveis Tipo Placas Irrradiados**. Orientador: Luís Antônio Albiac Terremoto. 1998. 90 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/10689/06173.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 jan out. 2021.

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

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