



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL de LONDRINA

---

LÍVIA MARIA TAVARES FONTANA

**ARGAMASSA PESADA COM ESCÓRIA DE ACIARIA DE  
FORNO ELÉTRICO PARA ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO**

LÍVIA MARIA TAVARES FONTANA

**ARGAMASSA PESADA COM ESCÓRIA DE ACIARIA DE  
FORNO ELÉTRICO PARA ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Profa Dra Berenice Martins Toralles.

Londrina  
2015

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

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

**F679a** Fontana, Livia Maria Tavares.

Argamassa pesada com escória de aciaria de forno elétrico para atenuação de radiação / Livia Maria Tavares Fontana. – Londrina, 2015.

135 f.: il.

Orientador: Berenice Martins Toralles.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2015.

Inclui bibliografia.

1. Argamassa – Teses. 2. Blindagem (Radiação) – Teses. 3. Porosidade – Teses. 4. Ferro gusa – Teses. 5. Aciara – Teses. I. Toralles, Berenice Martins. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

CDU 628

LÍVIA MARIA TAVARES FONTANA

**ARGAMASSA PESADA COM ESCÓRIA DE ACIARIA DE  
FORNO ELÉTRICO PARA ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Profa. Dra. Berenice Martins  
Toralles  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo  
Universidade de São Paulo - USP

---

Prof. Dr. Aron Lopes Petrucci  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Paulo Sérgio Bardella  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 19 de outubro de 2015.

## DEDICO

Aos meus pais, Ernani e Roseane, e aos meus irmãos, Talita e Neto, que apesar da distância sempre se fazem presentes. Obrigada por tudo!

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por guiar meus passos, por escrever certo em linhas tortas e por continuar me surpreendendo.

À minha orientadora, Profa Dra Berenice Martins Toralles, pela paciência, dedicação, conhecimentos transmitidos e oportunidades oferecidas. Muito obrigada por perceber em mim um potencial que eu desconhecia!

Ao Prof Dr Avacir Casanova Andrello e ao doutorando Thiago Milano, pelo auxílio com os ensaios de porosidade e atenuação de radiação, essenciais para a realização deste trabalho.

Agradeço aos membros da Banca Examinadora, pela disponibilidade de participar e pelas contribuições pessoais acerca da dissertação.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio e compreensão. Essa conquista também é de vocês!

À toda minha família, obrigada pela força e torcida.

À minha amiga Talita Kato, pela ajuda com a realização dos ensaios nos horários mais alternativos, por aguentar os momentos de cansaço e reclamação. Muito obrigada!

Ao amigo Gersson Barreto, pela companhia e apoio no NUDE.

Aos queridos Fernando Forin e Priscilla Assis, pelos momentos de descontração tão necessários.

Ao amigo Luciano Medina, pelo apoio com as análises estatísticas deste trabalho.

Aos professores do Programa ENGES, que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa, em especial, à Profa Dra Raquel Texeira, por disponibilizar as instalações do laboratório de Mecânica dos Solos.

Aos colegas do ENGES, Isis Peixoto, Felipe Jesus, José Carlos Gasparine, e em especial, Tatiana Vettori.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais, Estruturas e Solos, Anderson, André, Luis e Audinil. Em especial ao querido Carlos Alberto Duarte, técnico da Maquetaria, por auxiliar com a execução das formas e corte de amostras para os ensaios.

Aos alunos de iniciação científica, Caroline Dias, Jannayna de Carli, Gabriel Heckler, Bruno e Caio Alcântara, pela ajuda no peneiramento da escória e

nos ensaios de caracterização.

Ao Giancarlo Candeo Andreotti, técnico do setor de resíduos químicos, por fazer a gentileza de buscar a escória de aciaria deste trabalho.

À Maria José Sartor e ao Luciano, do ReciclaUEL, por triturar a escória de aciaria.

À empresa Politécnica pelo rompimento de corpos de prova.

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pelo auxílio financeiro concedido na forma de bolsa.

FONTANA, Livia Maria Tavares. **Argamassa pesada com escória de aciaria de forno elétrico para atenuação de radiação**. 2015. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

## RESUMO

A escória de aciaria FEA, devido a sua elevada massa específica, pode vir a ser um material alternativo ao chumbo e à barita como agregado pesado na produção de argamassas e concretos com finalidade de blindagem radiológica. A indústria siderúrgica é uma grande geradora de resíduos, produzindo, em média, 600 kg de resíduos e coprodutos por tonelada de aço e estima-se que, no refino de cada tonelada de aço, são gerados de 70 kg a 170 kg de escória de aciaria. O uso da escória de aciaria de forno elétrico (FEA) como agregado representa um ganho ambiental, já que a escória de alto forno tem destinação, como adição na indústria cimentícia, e a de aciaria não possui emprego determinado. Outra vantagem do emprego da escória de aciaria é a possível redução do consumo de recursos naturais não renováveis. Neste sentido, objetivou-se com este trabalho comprovar a viabilidade técnica da utilização da escória de aciaria de forno elétrico como agregado pesado, em substituição à barita, na produção de argamassa de revestimento para blindagem de radiação. Para atingir o objetivo proposto, produziram-se três argamassas: a de referência, sendo esta uma argamassa baritada comercial; uma segunda composta somente por agregado siderúrgico e a terceira, por agregados siderúrgicos e baríticos. Para a formulação das argamassas, partiu-se do princípio de que deveriam ter elevada massa específica, baixa porosidade e, conseqüentemente, um elevado coeficiente de atenuação de radiação. Foram realizados dois estudos preliminares para determinar a pasta menos porosa e o esqueleto granular mais compacto. Verificou-se, com base nos estudos preliminares, que o refinamento do esqueleto granular e a diminuição da porosidade da pasta contribuíram para a obtenção de argamassas mais densas e compactas. Os resultados mostraram que a argamassa que obteve o maior potencial de atenuação de radiação foi a que tinha escória e barita em sua composição, sendo 10% maior que a argamassa de escória e 23,23% superior a argamassa de referência. Comprovou-se que a utilização da escória de aciaria de forno elétrico (FEA) como agregado pesado contribuiu positivamente com as características físicas e mecânicas das argamassas.

**Palavras-chave:** Empacotamento. Agregado pesado. Coproduto do aço. Porosidade.

FONTANA, Livia Maria Tavares. **Heavyweight mortar with electric arc furnace slag for radiation attenuation**.2015. 135 p.Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

## **ABSTRACT**

The steel slag FEA, due to its high density, might be an alternative material to lead and barite as heavyweight aggregate in the production of mortars and concretes with radiological shielding purpose. The steel industry is a major generator of waste, producing, on average, 600 kg of waste and byproducts per ton of steel and it is estimated that, in the refining of every ton of steel, it is generated from 70 kg to 170 kg of steel slag. The use of electric furnace steel slag (FEA) as an aggregate represents an environmental gain, since the blast furnace slag has a destination, as in the cement industry, and the steel slag has no particular use. Another advantage of using slag is the possibility of reducing the consumption of non-renewable natural resources. Thus, the aim of this study was to prove the technical viability of using the electric furnace steel slag as heavyweight aggregate, replacing the barite in the production of coating mortar for radiation shielding. To achieve the proposed objective, three mortars were produced: the reference, which is a commercial barium mortar; a second one composed only of steel slag and the third, of steel slag and barium aggregates. For the formulation of mortars, it was assumed that they should have high specific mass, low porosity and, consequently, a high coefficient of radiation attenuation. There were two preliminary studies performed to determine the least porous paste and more compact granular skeleton. It was found, based on preliminary studies, that refinement of the granular skeleton and decrease of the porosity of the paste contributed to the achievement of more dense and compact mortars. The results showed that the mortar that had the highest potential for radiation attenuation was the one that had steel slag and barite in its composition, being 10% higher than the steel slag mortar and 23,23% higher than the reference mortar. It was proved that the use of electric furnace steel slag (FEA) as heavyweight aggregate positively contributed to the physical and mechanical characteristics of mortars.

**Key-words:** Packing. Heavyweight aggregate. Steel slag. Porosity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 –</b>	Representação da emissão de radiação gama pelo núcleo.....	22
<b>Figura 2 –</b>	Atenuação de um feixe de fótons por um material de espessura x.....	24
<b>Figura 3 -</b>	Representação da atenuação de fótons por um material absorvedor .....	24
<b>Figura 4 –</b>	Fotomicrotomografia indicando a ocorrência de poros para uma amostra de Siltito (rocha sedimentar) .....	30
<b>Figura 5 -</b>	Esquema de aquisição de imagens do micro-CT.....	30
<b>Figura 6 –</b>	Reconstrução de uma amostra conforme a quantidade de radiografias .....	31
<b>Figura 7 –</b>	Etapas de processamento de imagens obtida através de microtomografia de raios-X.....	31
<b>Figura 8 –</b>	Empacotamento – influencia do tamanho e quantidade de partículas: (a) mínimo empacotamento; (b) máxima empacotamento; (c) falta de partículas pequenas; (d) falta de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas .....	34
<b>Figura 9 -</b>	Fluxo simplificado de produção de aço bruto.....	39
<b>Figura 10 -</b>	Produção do ferro-gusa, produção do aço e das correspondentes escórias.....	40
<b>Figura 11 -</b>	Fluxograma do trabalho experimental.....	45
<b>Figura 12 -</b>	Pó de barita.....	48
<b>Figura 13 –</b>	Agregado miúdo siderúrgico de escória de aciaria de forno elétrico .....	48
<b>Figura 14 –</b>	Argamassa baritada .....	49
<b>Figura 15 –</b>	Fluxograma das etapas realizadas no Estudo Preliminar – A.....	51
<b>Figura 16 –</b>	a) Aparelho de micro-CT SkyScan 1172 b) Posicionamento da amostra de pasta no aparelho .....	53
<b>Figura 17 –</b>	Fluxograma das etapas realizadas para selecionar o esqueleto granular da Parte 2.....	54
<b>Figura 18 –</b>	Página do programa EMMA para cadastrar os materiais utilizados na dosagem da argamassa.....	56

<b>Figura 19</b> –	Formulação final da argamassa e representação gráfica do empacotamento baseado, neste caso, no modelo de Alfred .....	57
<b>Figura 20</b> –	Parâmetros de cálculo usados no programa EMMA.....	58
<b>Figura 21</b> –	Pesagem das frações para montagem da areia .....	59
<b>Figura 22</b> –	Frações após pesagem e homogeneização da areia de escória FEA .....	59
<b>Figura 23</b> -	Fluxograma das etapas realizadas no Estudo preliminar – B .....	61
<b>Figura 24</b> –	Formas utilizadas nos ensaios: a) Molde cilíndrico b) Forma 100 x 100 x 30 mm c) Forma 50 x 50 x 30 mm.....	65
<b>Figura 25</b> –	Adensamento dos corpos de prova na mesa vibratória .....	66
<b>Figura 26</b> –	a) Amostras após adensamento b) Amostras cobertas com placas de vidro.....	67
<b>Figura 27</b> –	a) Corte com serra circular das amostras após 7 dias. b) Amostra pronta para o ensaio de porosidade, com dimensões de 10 x 10 x 30 mm .....	67
<b>Figura 28</b> –	Amostras para o ensaio de atenuação de radiação seladas com plástico PVC.....	68
<b>Figura 29</b> –	Ensaio de ultrassom.....	69
<b>Figura 30</b> –	a) Localização da amostra dentro do micro-CT b) Amostra fixada ao porta-amostra com cera ortodôntica.....	70
<b>Figura 31</b> -	Uso de paquímetro para tomada das medidas das espessuras dos corpos de prova .....	71
<b>Figura 32</b> -	Mesa micrométrica usada para obter o coeficiente de atenuação de radiação gama das argamassas .....	72
<b>Figura 33</b> -	Índice de consistência da argamassa de referência (ArgRef).....	91
<b>Figura 34</b> -	Índice de consistência da argamassa de escória (ArgEA).....	92
<b>Figura 35</b> -	Índice de consistência da argamassa de escória e barita (ArgEA+B).....	92
<b>Figura 36</b> –	Ensaio de absorção de água por capilaridade para a argamassa de referência (ArgRef): a) corpo de prova após ensaio b) corpo de prova não submetido ao ensaio .....	101
<b>Figura 37</b> –	Absorção de água por capilaridade: a) argamassa de escória (ArgEA); b) argamassa de escória e barita (ArgEA+B).....	102

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 –</b>	Coeficientes de atenuação de radiação conforme diversos autores .....	18
<b>Quadro 2 -</b>	Radionuclídeos e suas propriedades .....	23
<b>Quadro 3 –</b>	Valores de $\mu$ e $x^{1/2}$ em função da energiado fóton em diferentes meios .....	26
<b>Quadro 4 –</b>	Valores de $\mu$ e $x^{1/2}$ em função da energiado cézio, cobalto e irídio, em diferentes meios.....	27
<b>Quadro 5 –</b>	Composição e massa específica de agregados pesados.....	36
<b>Quadro 6 -</b>	Características físicas das escórias de aciaria fea conforme alguns autores .....	42
<b>Quadro 7 –</b>	Materiais utilizados na produção das argamassas .....	46
<b>Quadro 8 -</b>	Características físicas e mecânicas do cp ii-e-32.....	47
<b>Quadro 9 -</b>	Ensaio e respectivas normas para caracterizar a areia de escória de aciaria fea e a areia de escória de aciaria fea com barita.....	50
<b>Quadro 10 -</b>	Relações água/cimento para verificação da porosidade da pasta.....	52
<b>Quadro 11 –</b>	Combinações de areia de escória de aciaria fea com pó de barita .....	62
<b>Quadro 12 –</b>	Composição das areias utilizadas para fazer as argamassas do estudo preliminar – b: parte 2 .....	63
<b>Quadro 13 -</b>	Ensaio e respectivas normas para argamassa no estado fresco.....	64
<b>Quadro 14-</b>	Planejamento e normas utilizadas nos ensaios para as argamassas .....	65

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 –</b>	Materiais componentes da argamassa baritada .....	37
<b>Tabela 2 –</b>	Características físicas e mecânicas da argamassa baritada .....	38
<b>Tabela 3 -</b>	Produção mundial de aço bruto em 2013 .....	41
<b>Tabela 4 -</b>	Composição granulométrica da areia estabelecida pela norma do cstb dtu 26.1/78, porcentagem retida (adaptado de tristão, 1995).....	54
<b>Tabela 5 -</b>	Consumo de materiais para produção da argamassa argea .....	60
<b>Tabela 6 -</b>	Consumo de materiais para produção da argea+b.....	63
<b>Tabela 7 -</b>	Consumo de materiais para a argref (argamassa de referência) .....	64
<b>Tabela 8 -</b>	Composição granulométrica do pó de barita. ....	75
<b>Tabela 9 –</b>	Massas específica e unitária do agregado barítico.....	76
<b>Tabela 10 -</b>	Composição granulométrica do agregado miúdo siderúrgico.....	77
<b>Tabela 11 -</b>	Parâmetro de caracterização do agregado siderúrgico .....	78
<b>Tabela 12 -</b>	Composição granulométrica da areia de escória de aciaria fea (ae) .....	79
<b>Tabela 13 -</b>	Resultado do ensaio de caracterização da areia de escória de aciaria fea (ae).....	80
<b>Tabela 14 –</b>	Composição granulométrica da areia com combinação de escória de aciaria fea e pó de barita (ae+b) .....	80
<b>Tabela 15 -</b>	Resultado do ensaio de caracterização da combinação de escória de aciaria fea e pó de barita (ae+b) .....	81
<b>Tabela 16 –</b>	Relações água/cimento e respectivas porcentagens de poros, sem utilização de aditivo.....	82
<b>Tabela 17 -</b>	Relações água/cimento e respectivas porcentagens de poros, com utilização de aditivo.....	83
<b>Tabela 18 -</b>	Composição granulométrica da areia de escória de aciaria fea ajustada pelo modelo de alfred e pelo programa emma.....	85
<b>Tabela 19 –</b>	Resultado das massas unitárias obtidas a partir de diferentes combinações de ae+b.....	87
<b>Tabela 20 –</b>	Coeficiente de atenuação obtido através de argamassas com teores variáveis de barita.....	88

<b>Tabela 21 –</b>	Resultados do ensaio de massa específica das argamassas de referência, de escória e de escória e barita.....	90
<b>Tabela 22 -</b>	Resultados do ensaio de consistência das argamassas de referência, de escória e com combinação de escória e barita.....	91
<b>Tabela 23 -</b>	resultados do ensaio de resistência à compressão para as argamassas na idade de 7 e 28 dias.....	93
<b>Tabela 24 -</b>	Resultados do ensaio de resistência à tração para as argamassas argref, argea e argea+b .....	95
<b>Tabela 25 -</b>	Resultados das resistências à compressão, das massas específica e dos módulos de elasticidade da argamassa de referência (argref), de escória (argea) e de escória e barita (argea+b).....	96
<b>Tabela 26 -</b>	Ensaio de absorção de água para a argamassa com combinação de escória e barita na idade de 28 dias.....	98
<b>Tabela 27 –</b>	Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade para as argamassas argref, argea e argea+b .....	100
<b>Tabela 28 –</b>	Resultados dos coeficientes de atenuação de radiação obtidos para as argamassas argref, argea e argea+b .....	103
<b>Tabela 29 -</b>	Coeficientes de atenuação das argamassas e as respectivas espessuras de camada semi redutora.....	104
<b>Tabela 30 -</b>	Tabela comparativa do desempenho estatístico das argamassas conforme os ensaios .....	105

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 -</b>	Variação do coeficiente de atenuação linear em relação aos teores de barita.....	20
<b>Gráfico 2 –</b>	Comparação entre diversos materiais correlacionando o coeficiente de atenuação com sua massa específica.....	21
<b>Gráfico 3 -</b>	Consumo de barita na forma de produtos brutos no ano de 2012 .....	43
<b>Gráfico 4 -</b>	Consumo de barita na forma de produtos beneficiados no ano de 2012.....	44
<b>Gráfico 5 –</b>	Curva granulométrica do cp ii-e-32.....	75
<b>Gráfico 6 -</b>	Curva granulométrica do pó de barita .....	76
<b>Gráfico 7 -</b>	Curva granulométrica do agregado miúdo siderúrgico .....	77
<b>Gráfico 8 –</b>	Curva granulométrica da argamassa baritada comercial usada como argamassa de referência .....	78
<b>Gráfico 9 -</b>	Curva granulométrica da areia de escória de aciaria fea e limites da nbr 7211/2009 .....	79
<b>Gráfico 10 -</b>	Curva granulométrica da areia com combinação de escória de aciaria fea e barita e os limites da nbr 7211/2009 .....	81
<b>Gráfico 11 –</b>	Porosidade das pastas sem aditivo e respectivas resistências à compressão .....	83
<b>Gráfico 12 -</b>	Porosidade das pastas com aditivo e respectivas resistências à compressão .....	84
<b>Gráfico 13 -</b>	Distribuição das partículas com a utilização da areia com a composição granulométrica da norma cstb dtu 26.1/78 e cimento cp ii e - 32 .....	85
<b>Gráfico 14 –</b>	Distribuição das partículas da argamassa de escória de aciaria fea comparada ao modelo de empacotamento de alfred.....	86
<b>Gráfico 15 –</b>	Comparação do resultado das massas unitárias obtidas a partir de diferentes combinações de ae+b.....	87
<b>Gráfico 16 –</b>	Comparação entre os coeficientes de atenuação obtidos com as argamassas com teores variáveis de barita.....	88

<b>Gráfico 17 –</b>	Comparação massa específica das argamassas argref, argea e argea+b .....	90
<b>Gráfico 18 –</b>	Comparação entre as resistências à compressão da argamassa de referência (argref), de escória (argea) e de escória e barita (argea+b) .....	94
<b>Gráfico 19 –</b>	Comparação entre as resistências à tração das argamassas argref, argea e argea+b.....	95
<b>Gráfico 20 -</b>	Comparação entre os módulos de elasticidade da argamassa de referência (argref), de escória (argea) e de escória e barita (argea+b) .....	97
<b>Gráfico 21 -</b>	Comparação entre a absorção de água e índice de vazios das argamassas de referência (argref), de escória (argea) e de escória e barita (argea+b) .....	99
<b>Gráfico 22 -</b>	Comparação dos resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas de referência (argref), de escória (argea) e de escória e barita (argea+b) .....	100
<b>Gráfico 23 -</b>	Comparação entre os coeficientes de atenuação das argamassas e as respectivas massas específicas no estado endurecido.....	103
<b>Gráfico 24 –</b>	Comparação entre os coeficientes de atenuação das argamassas e as respectivas espessuras de camada semi redutora .....	104

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 .....	23
EQUAÇÃO 2 .....	25
EQUAÇÃO 3 .....	25
EQUAÇÃO 4 .....	25
EQUAÇÃO 5 .....	69
EQUAÇÃO 6 .....	69
EQUAÇÃO 7 .....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE	Areia de escória
AE+B	Areia com combinação de escória e barita
ArgEA	Argamassa de escória
ArgEA+B	Argamassa de escória e barita
CEB/FIP 2010	Comité Euro/Internacional du Béton
CP	Cimento Portland
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DTU	Documents Techniques Unifiés
FEA	Forno elétrico a arco
LAB uTM	Laboratório de Microtomografia por Raios-X (UEL)
LAMIR	Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (UFPR)
LD	Linz e Donawitz
NBR	Norma Brasileira

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1	JUSTIFICATIVA .....	13
1.2	OBJETIVOS .....	14
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
1.2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO .....	14
1.3	HIPÓTESE.....	14
1.4	CONDIÇÃO DE CONTORNO .....	14
1.5	CONTRIBUIÇÃO ESPERADA .....	14
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1	ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO .....	16
2.1.1	Radiação Gama.....	21
2.1.2	Cálculo da Atenuação de Radiação pela Matéria .....	23
2.2	POROSIDADE .....	27
2.3	COMPACIDADE .....	32
2.4	ARGAMASSA PESADA .....	35
2.4.1	ARGAMASSA BARITADA.....	37
2.5	A ESCÓRIA DE ACIARIA DE FORNO ELÉTRICO E O AÇO .....	38
2.6	A BARITA.....	42
<b>3</b>	<b>TRABALHO EXPERIMENTAL</b> .....	45
3.1	MATERIAIS .....	46
3.1.1	Cimento Portland.....	47
3.1.2	Pó de Barita.....	47
3.1.3	Agregado de Escória de Aciaria de Forno Elétrico (fea).....	48
3.1.4	Argamassa Baritada .....	48
3.1.5	Aditivo Polifuncional .....	49
3.1.6	Água .....	49
3.2	MÉTODO .....	49
3.2.1	Caracterização dos Agregados .....	50
3.2.2	Estudos Preliminares.....	51

3.2.2.1	Estudo Preliminar a .....	51
3.2.2.1.1	Parte 1 - Seleção da Pasta.....	52
3.2.2.1.2	Parte 2 - seleção do esqueleto granular da areia de escória de aciaria FEA .....	53
3.2.2.2	Estudo Preliminar b .....	60
3.2.2.2.1	Parte 1 - Seleção do Esqueleto Granular da Areia de Escória de Aciaria FEA e pó de barita.....	61
3.2.2.2.2	Parte 2 - seleção da pasta com diferentes relações a/c .....	62
3.2.2.3 3 <sup>a</sup>	Campanha Experimental .....	63
3.2.2.4	Consumos de Materiais da Argamassa de Referência (ARGREF) .....	63
3.2.2.5	Planejamento dos Ensaios para as Argamassas no Estado Fresco e Endurecido .....	64
3.2.2.6	Ensaios no Estado Endurecido.....	68
3.2.2.6.1	<i>Módulo de elasticidade</i> .....	68
3.2.2.6.2	<i>Porosidade</i> .....	70
3.2.2.6.3	<i>Atenuação de radiação gama</i> .....	71
3.2.2.7	Análise estatística dos resultados .....	72
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE</b> .....	<b>74</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....	74
4.1.1	Cimento Portland.....	74
4.1.2	Pó de Barita.....	75
4.1.3	Agregado de Escória de Aciaria de Forno Elétrico .....	77
4.1.4	Argamassa Baritada .....	78
4.1.5	Areia de Escória de Aciaria FEA .....	79
4.1.6	Combinação de Escória de Aciaria FEA e Pó de Barita .....	80
4.2	ESTUDOS PRELIMINARES .....	82
4.2.1	Estudo Preliminar – A.....	82
4.2.1.1	Parte 1 – Seleção da pasta .....	82
4.2.1.2	Parte 2 – Seleção do esqueleto granular da areia de escória de aciaria FEA .....	84
4.2.2	Estudo Preliminar – b .....	86

4.2.2.1	Parte 1 – Seleção do esqueleto granular da areia de escória de aciaria FEA e pó de barita .....	86
4.2.2.2	Parte 2 – Seleção da pasta .....	88
4.3	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO .....	89
4.3.1	Massa Específica .....	89
4.3.2	Índice de Consistência .....	91
4.4	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO .....	93
4.4.1	Resistência à Compressão.....	93
4.4.2	Resistência à Tração.....	95
4.4.3	Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	96
4.4.4	Absorção de Água .....	98
4.4.5	Absorção de Água por Capilaridade.....	100
4.4.6	Atenuação de Radiação .....	102
4.4.6.1	Cálculo da espessura de atenuação de radiação.....	104
4.5	TABELA COMPARATIVA DO DESEMPENHO ESTATÍSTICO DAS ARGAMASSAS CONFORME OS ENSAIOS .....	105
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>107</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	109
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>110</b>
	<b>ANEXO A</b> .....	<b>118</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Existe um aumento expressivo da preocupação da comunidade mundial em relação à preservação do meio ambiente (KRAEMER, 2005). Neste âmbito, as indústrias e empresas sofrem cada vez mais cobranças para que cresçam de maneira sustentável, isto é, de forma tecnológica, econômica e social sem prejudicar o meio ambiente e o futuro das próximas gerações.

Na construção civil, esta realidade não é diferente. A engenharia moderna procura se aprimorar a fim de produzir argamassas e concretos com excelentes propriedades físicas e mecânicas e relação custo benefício satisfatória incluindo de reduzir desperdícios. Ademais, como forma de preservar o meio ambiente, à utilização de materiais como resíduos e coprodutos na formulação de concretos e argamassas especiais apresentou crescimento e visibilidade nos últimos anos (BINICI *et al.*, 2014).

Neste cenário, surge a indústria siderúrgica, que é uma grande geradora de resíduos. Estima-se que, no refino de cada tonelada de aço, são gerados 600 kg de coprodutos e resíduos, dentre esses de 70 kg a 170 kg de escória de aciaria por toneladas, sendo que, somente no ano de 2012, a produção de agregados siderúrgicos foi de 11,15 milhões de toneladas (IABR, 2013).

Diferentemente da escória de alto forno, que é praticamente toda destinada à indústria cimentícia, a escória de aciaria de forno elétrico (FEA) não possui uma aplicação específica (IABR, 2013). Assim, uma maneira de minorar as áreas de bota-fora em pátios siderúrgicos e também minimizar a extração de recursos naturais não renováveis seria utilizar a escória de aciaria FEA como agregado pesado para argamassa e concreto.

Devido a sua elevada massa específica, a escória de aciaria de forno elétrico a arco (FEA) pode ser utilizada como agregado pesado alternativo ao lençol de chumbo, à barita e à argamassa baritada na proteção contra radiação (GONZÁLEZ-ORTEGA *et al.*, 2014).

O chumbo, devido a sua elevada densidade, foi amplamente utilizado como meio de proteção radiológica na atenuação dos efeitos da exposição à radiação, todavia seu custo e dificuldade de aplicação impulsionaram pesquisas com outros materiais (BINICI *et al.*, 2014).

A barita é o agregado mais utilizado para a produção de argamassa

e concreto pesado como alternativa ao chumbo na proteção contra radiação (TOPÇU, 2003), porém em razão da exploração excessiva das reservas mundiais, está propensa a se tornar um mineral escasso e de alto valor comercial (COELHO, 2009).

Já a argamassa baritada possui sulfato de bário em sua composição, sendo vendida pronta para o uso e tal como o chumbo, apresenta elevada densidade (4000 a 5000 kg/m<sup>3</sup>). Por ter um custo menor e atenuar radiação de baixa e média energia, é frequentemente utilizada em substituição aos lençóis de chumbo (FRIMAIO, 2006).

Neste cenário, o uso da escória de aciaria (FEA), que possui massa específica, em torno de 3300 a 3780 kg/m<sup>3</sup>, aparece como uma opção ecológica e econômica de agregado pesado (GONZÁLEZ-ORTEGA *et al.*, 2014; PELLEGRINO *et al.*, 2013).

Assim, com base nos dados a respeito da geração das escórias e devido ao fato de a escória de aciaria (FEA) não possuir uma destinação específica, este trabalho se justifica por agregar valor a um coproduto.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Com base nos dados a respeito da geração da escória de aciaria de forno elétrico (FEA) e devido ao fato desta não possuir uma destinação definida como a escória de alto forno, este trabalho justifica-se por agregar valor a um coproduto da produção do aço possibilitando sua utilização como agregado pesado em substituição aos agregados convencionalmente utilizados na produção de argamassa pesada.

O emprego da escória de aciaria (FEA), devido a sua elevada massa específica, juntamente com a barita pode representar uma redução do custo de produção da argamassa de revestimento com função de atenuação radiológica, quando comparado com a argamassa que possui somente a barita em sua composição.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade técnica de utilização da escória de aciaria de forno elétrico (FEA) como agregado pesado, em substituição à barita, na produção de argamassa pesada para atenuação de radiação.

### 1.2.2 Objetivo Específico

Quantificar a equivalência em chumbo das argamassas produzidas em comparação com a argamassa baritada comercial.

## 1.3 HIPÓTESE

É possível produzir argamassa pesada com a finalidade de atenuar radiação com areia de escória de aciaria de forno elétrico em substituição a barita.

## 1.4 CONDIÇÃO DE CONTORNO

Será estudada a aplicação da escória de aciaria de forno elétrico e da barita somente como agregado para argamassa pesada, e não como adição.

Vale salientar que, neste trabalho, não é abordado à questão da toxicidade com relação ao uso de agregado pesado proveniente da produção do aço (escória de aciaria de forno elétrico - FEA).

## 1.5 CONTRIBUIÇÃO ESPERADA

Espera-se com este trabalho apresentar dados que comprovem a viabilidade da utilização da escória de aciaria de forno elétrico como agregado em argamassas com função de barreira radiológica.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

A introdução ao tema e a contextualização da situação da escória de aciaria FEA são apresentadas neste primeiro capítulo. Também são expostos os objetivos, a justificativa, a condição de contorno e a hipótese deste trabalho.

A revisão bibliográfica se encontra inserida no segundo capítulo, onde se apresentam explicações a respeito da argamassa pesada, da escória de aciaria FEA, da barita e da argamassa baritada. Também apresentam-se dados com relação a porosidade, distribuição granulométrica e atenuação de argamassas e concretos.

Os materiais e o método utilizados para a realização dos ensaios de caracterização dos agregados, bem como dos estudos preliminares e a produção das argamassas são exibidos no terceiro capítulo.

Os resultados e análise obtidos através da caracterização dos agregados, produção das argamassas e atenuação de radiação são mostrados no quarto capítulo.

E finalmente, no quinto capítulo é apresentada a conclusão a respeito do uso da escória de aciaria de forno elétrico como agregado pesado para argamassa. Também neste capítulo sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o melhor entendimento do tema objeto deste trabalho, neste capítulo, são apresentados conceitos gerais, características e propriedades sobre atenuação de radiação e os materiais utilizados para este fim. Destaque é dado para a escória de aciaria de forno elétrico a arco (FEA) como agregado pesado.

### 2.1 ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO

Desde o descobrimento da radiação até os dias atuais houve uma evolução com relação aos mecanismos de proteção da população afetada direta ou indiretamente pelo tratamento com radiologia diagnóstica. Se nos primórdios da descoberta da radiação não se sabia dos efeitos nocivos hoje em dia se tem a comprovação científica dos efeitos tanto malignos quanto benignos causados pelo uso da radiação (COSTA, 1999).

A radiação se aplicada de forma correta e embasada nas diretrizes das normas protetoras traz benefícios. O seu uso indiscriminado e descontrolado pode acarretar em efeitos nocivos à saúde dos seus usuários. Dentro deste contexto, surgem as publicações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) com a intenção de padronizar e regulamentar o uso e, como resultado, se obter uma efetiva proteção radiológica (COSTA, 1999).

Para padronizar os requisitos de proteção frente a crescente utilização de radiações ionizantes surgiram publicações como o NCRP 147 (National Council on Radiation Protection and Measurements), a portaria nº 453 do Ministério da Saúde e o CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) NE 3.01, que devem ser seguidas para se obter uma efetiva proteção radiológica (FIRMINO, 2010).

Fatores como uso, ocupação e carga de trabalho devem ser levados em conta para que não se tenha ambientes com espessuras de proteção subdimensionadas, e conseqüentemente exposição imprópria a altos níveis de radiação (FRIMAIO, 2006; BARROS *et al.*, 2001).

Com o intuito de absorver as radiações ionizantes são necessárias as chamadas barreiras de proteção. Materiais como chumbo e concreto são usualmente utilizados como material absorvedor para suprir esta função de proteção.

O dimensionamento e o tipo de material a ser utilizado dependem de fatores como: custo, sobrepeso da estrutura, facilidade de manuseio (caso das portas das salas de radiografia), tipo de radiação, densidade e número atômico dos materiais a serem usados, entre outros (BARROS, 2009; SHIRMARDI *et al.*, 2013).

Vários tipos de materiais podem ser usados como isolamento radioativo, desde que a espessura tenha a equivalência em chumbo e ofereça o mesmo grau de proteção (BITELLI, 1982).

A argamassa pesada e o concreto pesado devido as suas elevadas massas específicas e capacidade de absorção de nêutrons são muito utilizados como alternativa de proteção radiológica em salas de radioterapia, unidades médicas, usinas nucleares e também no transporte e armazenamento de resíduos (BINICI *et al.*, 2014; MASLEHUDDIN *et al.*, 2013; TOPÇU, 2003).

O concreto pesado absorve mais radiação considerando que sua densidade chega a ser uma vez e meia maior que a densidade do concreto normal (MOSTOFINEJAD *et al.*, 2012). O concreto convencional normalmente possui massa específica de 2400 kg/m<sup>3</sup>, enquanto o concreto pesado pode variar de 2900 a 6100 kg/m<sup>3</sup>, dependendo do agregado utilizado (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Conforme Carasek (2010), a argamassa pesada possui massa específica maior que 2300 kg/m<sup>3</sup>, enquanto a massa específica da argamassa convencional varia de 1400 a 2300 kg/m<sup>3</sup>.

É de consenso geral que a utilização de agregado pesado pode melhorar significativamente a propriedade de blindagem de radiação do concreto (LING *et al.*, 2013). Vários estudos como o de Binici *et al.* (2014), González-Ortega *et al.* (2014), Demir *et al.* (2011), Türkmen *et al.* (2008) e Akkurt *et al.* (2006) foram realizados com a intenção de investigar o efeito causado por diferentes tipos de agregados na blindagem de radiação do concreto.

A barita é o agregado mais usado para a produção de concreto pesado (TOPÇU, 2003), mas devido à exploração excessiva das reservas mundiais, está propensa a se tornar um mineral escasso e de alto valor comercial (COELHO, 2009).

Os minérios de ferro podem ser uma opção como agregados pesados, mas devido ao seu alto custo e difícil obtenção, buscaram-se outras matérias primas que tivessem semelhante potencial de atenuação de radiação se usado como agregado para concretos e argamassas (GENCEL *et al.*, 2012).

Neste contexto, surge a escória de aciaria FEA como uma alternativa ecológica e economicamente viável a barita, pois este coproduto da produção do aço não possui destinação específica e, portanto, tem baixo valor econômico.

Segundo Maslehuddin *et al.* (2013), a escória de aciaria FEA caracterizada como detentora de uma massa específica de 3510 kg/m<sup>3</sup> e seu uso concomitante com granalha de aço, na proporção de 50% de cada, gerou concretos com alto potencial de atenuação de radiação e resistência à compressão.

Verificou-se também que o concreto que melhor atenuou a radiação foi o que recebeu 100% de granalha de aço, mas em compensação a sua resistência a compressão foi menor que a obtida pelo concreto composto por escória de aciaria FEA e granalha. O concreto obtido através da composição da escória de aciaria FEA com a granalha de aço variou de 3146 a 3582 kg/m<sup>3</sup>.

Já para o concreto somente com escória de aciaria FEA, segundo Maslehuddin *et al.* (2003), conforme o aumento da proporção do agregado siderúrgico grosso a massa específica do concreto variou de 2436 a 2769 kg/m<sup>3</sup>.

No Quadro 1 são apresentados valores encontrados por diferentes autores para coeficientes de atenuação de radiação conforme a fonte emissora, o material, o tipo de agregado e a massa específica.

**Quadro 1** – Coeficientes de atenuação de radiação conforme diversos autores

Referência	Fonte emissora	Material	Tipo de agregado	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Coeficiente de atenuação (cm <sup>-1</sup> )
González-Ortega <i>et al.</i> (2014)	Césio 137	Concreto	Barita	3419	0,262
			Escória + Calcário	2819	0,216
Yilmaz <i>et al.</i> (2011)	Césio 137	Argamassa	Areia convencional + 20% Escória de alto forno	1950	0,173
			Areia convencional + 5% Sílica	2070	0,202
Demir <i>et al.</i> (2011)	Césio 137	Concreto	Barita	3451	0,261

Referência	Fonte emissora	Material	Tipo de agregado	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de atenuação (cm <sup>-1</sup> )
Akkurt <i>et al.</i> (2005)	Césio 137	Concreto	Barita	3452	0,255
Shirmardi <i>et al.</i> (2013)	Césio 137	Concreto	Concreto convencional	2460	0,197
			Concreto conv. + 50% Barita	2990	0,239
			Concreto conv. + 100% Barita	3463	0,274
		Chumbo	-	11900	1,207
Mostofinejad <i>et al.</i> (2012)	Cobalto 60	Concreto	Barita	3455	0,187
Akkurt <i>et al.</i> (2012)	Cobalto 60	Concreto	Siderita	2953	0,130*
			Barita	3414	0,150*
			Limonita	2600	0,140*

\*Valor aproximado

Fonte: da autora.

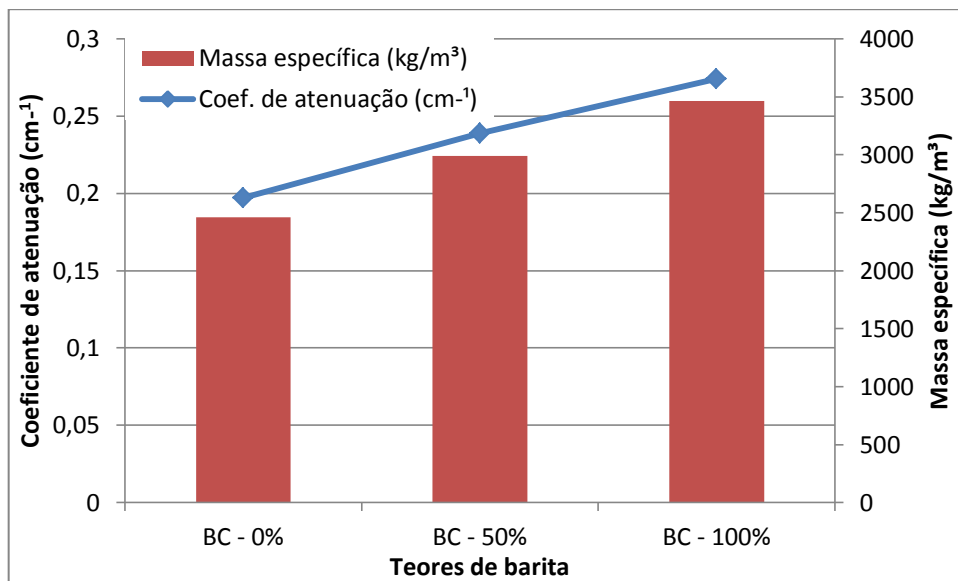
De acordo com Shirmardi *et al.* (2013) e Bitelli (1982), em baixa energia (caso do Césio - 0,661 MeV) a absorção fotoelétrica, isto é ejeção de elétrons do átomo deixando-o num estado ionizado, é o componente dominante, sendo que a atenuação é considerável. Com o aumento da energia, como por exemplo, para as fontes de Cobalto-60 (1,33 MeV), a absorção pelo meio é reduzida, e, portanto, o coeficiente de atenuação é reduzido.

Isto explica, conforme pode ser observado no Quadro 1, o porquê de concretos com praticamente a mesma massa específica, como é o caso dos concretos com barita dos autores Akkurt *et al.* (2005) e Mostofinejad *et al.* (2012), terem uma diferença significativa nos valores dos coeficientes de atenuação ao mudar a fonte emissora de raios gama.

Autores como Shirmardi *et al.* (2013), Mostofinejad *et al.* (2012), Demir *et al.* (2011), Gencil *et al.* (2011) constataram em seus trabalhos que o coeficiente de atenuação linear aumenta através do incremento da densidade.

Shirmardi *et al.* (2013), comparam três concretos com porcentagens variando de 0 a 100% de barita na composição, conforme Gráfico 1.

**Gráfico 1** - Variação do coeficiente de atenuação linear em relação aos teores de barita



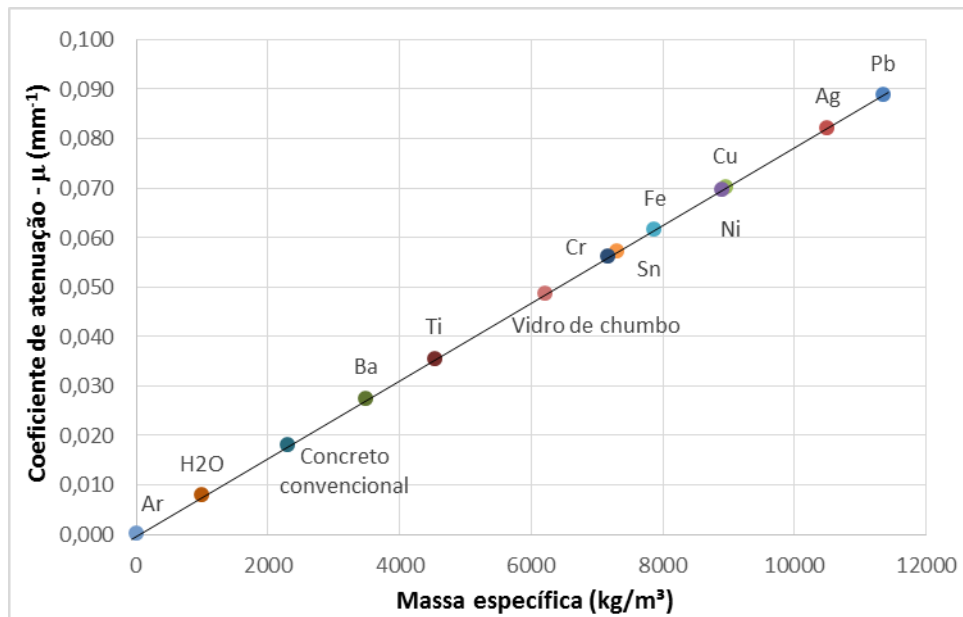
Fonte: adaptado de Shirmardi *et al.* (2013)

Eles verificaram que quanto maior o teor de barita mais elevada foi a massa específica do concreto e, conseqüentemente, maior o coeficiente de atenuação de radiação. O concreto com 100% de barita (BC-100%) obteve uma massa específica 28,96% maior que o concreto sem barita (BC – 0%) e 13,56% maior que o concreto BC-50%.

Assim, pode-se concluir que a utilização do agregado barita acarreta em um incremento significativo de massa específica e de atenuação de radiação em concretos.

No Gráfico 2 apresenta-se uma comparação entre diversos materiais correlacionando o coeficiente de atenuação com a massa específica.

**Gráfico 2** – Comparação entre diversos materiais correlacionando o coeficiente de atenuação com sua massa específica



Fonte: modificado de González-Ortega *et al.* (2014)

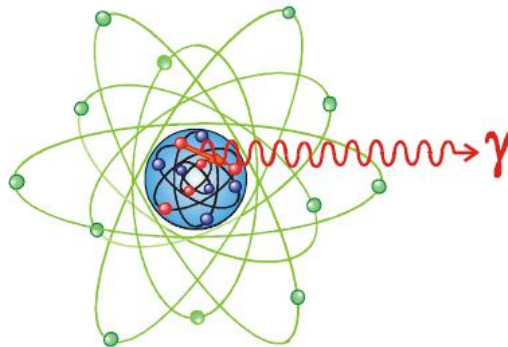
Verifica-se que o concreto convencional possui uma massa específica, aproximadamente, 77% menor que o chumbo, 75% menor que a prata e 70% menor que o cobre.

O chumbo, devido a sua elevada massa específica, se apresenta como elemento mais eficaz na atenuação de radiação, mas devido a sua toxicidade deve ser utilizado com cautela e não será objeto de estudo deste trabalho.

### 2.1.1 Radiação Gama

A radiação gama possui um alto poder de penetração, ao se propagar pela matéria sofre redução de intensidade, sendo parte de sua energia absorvida pelo meio. “Não é de natureza corpuscular e se constitui numa onda eletromagnética emitida pelo núcleo excitado” (BITELLI, 1982). Na Figura 1 é apresentada uma representação da emissão de radiação gama pelo núcleo.

**Figura 1** – Representação da emissão de radiação gama pelo núcleo



**Fonte:** Tauhata *et al.* (2003)

O núcleo instável (radionuclídeo) fica excitado alguns MeVs (mega elétrons volt) acima do seu estado fundamental ao transmitir partículas por emissão de radiação alfa ou beta. Assim, para retornar ao seu estado de equilíbrio é necessário emitir um ou mais fótons gama. A este fenômeno se nomeia de radioatividade (BITELLI, 1982; TAUHATA *et al.*, 2003; OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Como a emissão de radiação diminui gradualmente com o decorrer do tempo, outro conceito importante é o de meia-vida física, tempo necessário para que determinado radionuclídeo tenha sua radioatividade reduzida à metade. Pode levar de segundos até milhões de anos como é o caso do Urânio ( $^{238}\text{U}$ ) que tem meia-vida de  $4,46 \times 10^9$  anos (BITELLI, 1982; TAUHATA *et al.*, 2003).

As características físicas do radionuclídeo determinam a aplicação do composto, por terem intensidade de radiações bem definidas são muitas vezes utilizados “*como fontes de calibração de detectores e obtenção de suas curvas de eficiência de detecção*” (TAUHATA *et al.*, 2003). O Césio-137 produz energias gama de 0,662 MeV, e é empregado para calibrar detectores nucleares podendo ser utilizado em radioterapia, esterilização e para medir espessura de materiais. Já o Cobalto-60 origina dois raios gamas altamente penetrantes com energias de 1,173 e 1,332 MeV, sendo usado em tratamentos contra câncer, esterilização de equipamentos médicos e também como uma fonte radioativa de aferição (SHIRMARDI *et al.*, 2013).

No Quadro 2 são apresentados alguns valores de referência de radionuclídeos para as energias das radiações gama.

## Quadro 2 - Radionuclídeos e suas propriedades

Radionuclídeos	Cobalto ${}_{27}\text{Co}^{60}$	Césio ${}_{137}\text{Cs}^{55}$	Irídio ${}_{192}\text{Ir}^{77}$	Rádio ${}_{225}\text{Ra}^{88}$
Energia (MeV)	1,33	0,66	0,90	2,50
Meia – vida física	5,3 anos	30 anos	74 dias	1600 anos

Fonte: modificado de Bicini *et al.* (2014)

Pode-se observar no Quadro 2 que o decaimento radioativo não se processa na mesma velocidade para diferentes elementos. Assim, o tempo de meia-vida varia de um elemento para outro (ANDREUCCI, 2002).

Considerando que a interação da radiação com a matéria ocorre de uma forma diferente conforme o tipo de material e radiação incidida, é necessário calcular a atenuação de radiação pela matéria levando-se em conta que o coeficiente de atenuação apresenta valores diferentes conforme se muda à energia da fonte de radiação (BITELLI, 1982).

### 2.1.2 Cálculo da Atenuação de Radiação pela Matéria

A atenuação da radiação acontece de forma exponencial em função da espessura do material absorvedor (BITELLI, 1982). Sendo dada pela lei de Beer-Lambert, representada pela Equação 1 e Figura 2:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\mu$  é o coeficiente de atenuação linear;

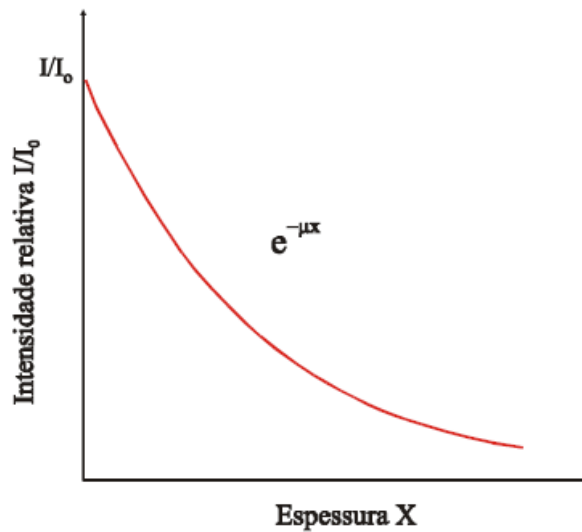
$x$  é a espessura do material absorvedor;

$I_0$  é a intensidade de radiação que incide no material;

$I$  é a intensidade de radiação que emerge do material.

“O coeficiente de atenuação linear é definido como a probabilidade de radiação interagir com um material por unidade de comprimento do percurso” (AKKURT *et al.*, 2006).

**Figura 2** – Atenuação de um feixe de fótons por um material de espessura  $x$



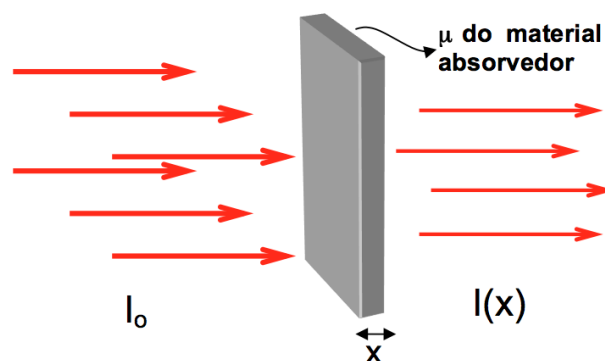
Fonte: Tauhata *et al.* (2003)

Isto é, “se um absorvedor reduz a intensidade de um feixe de radiação em 10%; um segundo absorvedor igual reduzirá 10% do feixe já reduzido em 10% e assim sucessivamente” (BITELLI, 1982).

Como se trata de uma lei exponencial, a utilização de um material absorvedor diminui a intensidade da radiação, mas não consegue anulá-la por completo (ANDREUCCI, 2002).

Na Figura 3 é mostrada uma representação da atenuação de fótons por um material absorvedor.

**Figura 3** - Representação da atenuação de fótons por um material absorvedor



Fonte: Hipermidia (2014)

Quanto mais espesso um material, maior a quantidade de radiação absorvida, ou seja, menor a intensidade do feixe que atravessa o material. A capacidade de absorção varia de material para material e depende principalmente da densidade do material e da energia de radiação (ANDREUCCI, 2002).

Ao isolar o coeficiente de atenuação linear tem-se a Equação 2:

$$\mu = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{x} \quad \text{Equação 2}$$

O coeficiente de atenuação pode variar conforme a densidade do material absorvedor, pois para um mesmo material pode haver variação de densidade, mediante, por exemplo, variação na compactação do material o que provoca uma redução dos vazios (JENKINS *et al.*, 1981 *apud* PIRES, 2006).

Assim, para haver uma padronização e independência do estado físico do material avaliado pode-se usar o coeficiente de atenuação de massa ( $\mu_m$ ) (TAUHATA *et al.*, 2003), conforme Equação 3:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Equação 3}$$

Onde  $\rho$ , em  $\text{kg/m}^3$ , é a densidade do material absorvedor. Assim, ao utilizar o coeficiente de atenuação de massa, o coeficiente de atenuação não muda conforme o estado do material (JENKINS *et al.*, 1981 *apud* PIRES, 2006).

Para calcular a espessura necessária para reduzir a intensidade do feixe de radiação à metade do valor inicial, conhecida por Camada Semi Redutora (CSR), utiliza-se a Equação 4 (BITELLI, 1982):

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{2} &= I_0 \times e^{-(\mu \cdot \text{CSR})} \rightarrow \frac{1}{2} = e^{-(\mu \cdot \text{CSR})} \\ \ln \frac{1}{2} &= -(\mu \cdot \text{CSR}) \rightarrow -\ln 2 = -(\mu \cdot \text{CSR}) \\ \text{CSR} &= \frac{\ln 2}{\mu} \rightarrow \mathbf{x_{\frac{1}{2}}} = \frac{\mathbf{0,693}}{\mu} \quad \text{Equação 4} \end{aligned}$$

Onde:

$\mu$  é o coeficiente de atenuação linear;

$CSR$  ou  $x_{\frac{1}{2}}$  é a espessura do material absorvedor;

$I_0$  é a intensidade de radiação que incide no material.

No Quadro 3 podem ser visualizados alguns valores de coeficientes de atenuação linear e camadas semi-redutora em função da energia do fóton em diferentes meios.

**Quadro 3** – Valores de  $\mu$  e  $x_{1/2}$  em função da energia do fóton em diferentes meios

Material	Água		Alumínio		Chumbo	
	$\mu$ (cm <sup>-1</sup> )	$x_{1/2}$ (cm)	$\mu$ (cm <sup>-1</sup> )	$x_{1/2}$ (cm)	$\mu$ (cm <sup>-1</sup> )	$x_{1/2}$ (cm)
<b>0,20</b>	0,196	7,2	0,360	1,9	5,000	0,14
<b>0,50</b>	0,133	5,2	0,230	3,0	1,600	0,43
<b>1,00</b>	0,071	9,8	0,168	4,1	0,790	0,88
<b>1,50</b>	0,057	12,2	0,136	5,1	0,590	1,17
<b>2,00</b>	0,050	14,0	0,177	5,9	0,504	1,37
<b>2,50</b>	0,044	15,8	0,104	6,7	0,472	1,47
<b>3,00</b>	0,040	17,4	0,096	7,2	0,460	1,51
<b>4,00</b>	0,035	20,0	0,083	8,4	0,468	1,48
<b>5,00</b>	0,031	22,1	0,075	9,4	0,488	1,42

Fonte: Bitelli (1982)

De acordo com o Quadro 3 verifica-se que para uma energia de, por exemplo, 1 MeV seriam precisos 9,8 cm de água, 4,1 cm de alumínio e 0,88 cm de chumbo para reduzir a intensidade de radiação a metade, isto é, são as espessuras para absorver 50% do feixe inicial. Ou seja, seria necessária uma espessura de água 91,02% maior que a espessura de chumbo e 58,16% maior que a de alumínio.

Nota-se também que conforme a energia cresce é necessário aumentar a espessura do material absorvedor.

No Quadro 4 visualiza-se alguns valores para camadas semi-redutora em função dos elementos Césio, Cobalto e Iridio, em diferentes meios.

**Quadro 4** – Valores de  $\mu$  e  $x_{1/2}$  em função da energia do Césio, Cobalto e Irídio, em diferentes meios

Fonte de radiação	Aço (7,8 g/cm <sup>3</sup> )	Concreto (2,3 g/cm <sup>3</sup> )	Chumbo (12 g/cm <sup>3</sup> )
	$x_{1/2}$ (cm)	$x_{1/2}$ (cm)	$x_{1/2}$ (cm)
Césio – 137	1,60	4,90	0,65
Cobalto – 60	2,00	6,30	1,10
Irídio – 192	1,30	4,30	0,55

Fonte: adaptado de IAEA (1996)

Verifica-se que para a fonte de radiação do Césio-137 será necessário uma espessura de concreto 86,73% maior que o chumbo e 67,35% maior que o aço para obter a mesma atenuação da radiação.

Assim, pode-se concluir que “quanto maior a espessura, mais elevada densidade e o número atômico de um certo material, maior será a quantidade de radiação absorvida” (ANDREUCCI, 2002).

Considerando que a densidade do material influencia diretamente na quantidade de radiação absorvida, e que a densidade pode ser alterada pela compactação, e esta por sua vez interfere na porosidade do material. Desta forma, neste trabalho foi dado destaque para as características de porosidade e compacidade.

## 2.2 POROSIDADE

Sabe-se que a estrutura interna de poros dos materiais podem afetar diversas de suas propriedades, como permeabilidade, durabilidade, dureza, entre outras. Desta forma pode-se relacionar a porosidade da pasta cimentícia diretamente com a resistência mecânica e o módulo de elasticidade (BEAUDOIN *et al.*, 1994).

Estudos como o de Lange *et al.* (1997), Jeenu *et al.* (2012) e Chen *et al.* (2013), comprovaram que a resistência à compressão aumenta conforme a diminuição da porosidade do composto cimentício.

A origem dos poros na pasta de cimento está diretamente ligada à hidratação do cimento e a evaporação da água livre (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Isto é, segundo Neville (1997), o teor de água exigido para a hidratação do cimento corresponde à relação água/cimento de 0,28. Quando uma quantidade de água maior do que a necessária é adicionada ao sistema resulta em água livre, que após a evaporação acarreta em um aumento no volume de poros capilares.

Quanto maior o volume de vazios para um mesmo volume de sólidos menor será a resistência mecânica (QUARCIONI *et al.*, 2009).

Segundo Mehta e Monteito (2014) e Gallucci *et al.* (2007), a porosidade do cimento pode ser classificada conforme o tamanho em:

- Os chamados "gel-poros", resultantes da reação do C-S-H. Possuem apenas alguns nanômetros de tamanho e exercem um pequeno papel nos processos de transporte que podem vir a afetar a durabilidade e desempenho dos concretos e argamassas;
- Os poros capilares são devidos aos espaços cheios de água originalmente não preenchidos por produtos de hidratação e tem tamanho variando de poucos nanômetros a dezenas de micrômetros;
- Os vazios de ar apresentam tamanhos variando de dezenas de  $\mu\text{m}$  a mm. Estes vazios correspondem a uma pequena fração de toda a porosidade, ficam isolados e praticamente não influem nos processos de transporte.

Sendo assim, a porosidade capilar é a que mais afeta os compósitos cimentícios pela sua rede interligada de transporte de água e impurezas químicas. Apesar de possuir um tamanho significativo os vazios de ar não afetam tanto, pois seus poros estão individualmente isolados (GALLUCCI *et al.*, 2007).

Existem diversos métodos para determinação da porosidade, alguns são: intrusão por mercúrio, índice de vazios pela NBR 9778, microtomografia de raios-X (Pessôa, 2011). Ao comparar métodos diferentes estes nem sempre apresentam valores semelhantes, segundo Neville (1997), isto pode ocorrer porque métodos que possuem a necessidade de se adicionar ou remover líquido podem comprometer e alterar a estrutura ensaiada.

De acordo com Cook e Hover (1993) apud Pessôa *et al.* (2014)

“Um exemplo disso é o uso da intrusão do mercúrio no estudo do sistema de poros da pasta de cimento, que admite que os poros vão se estreitando com o aumento da profundidade, ao passo que, na verdade, alguns poros têm uma abertura mais estreita, o que distorce o valor da porosidade determinado pela porosimetria por intrusão de mercúrio”.

Uma alternativa para caracterizar a quantidade de poros de materiais cimentícios pode ser a utilização de microtomografia computadorizada por transmissão de raios-X (micro-CT), que consiste em analisar a estrutura interna do material de maneira não destrutiva e de forma tridimensional, com alta resolução (MATTANA; COSTA, 2011; LIMA *et al.*, 2007).

Segundo Bernardes *et al.* (2013), a utilização de obtenção de porosidade por microtomografia de raios-X apresenta uma boa correlação com os resultados de porosidade obtidos a partir de ensaios de picnometria de hélio e mercúrio.

De acordo com Wan e Xu (2014), Maurício *et al.* (2012) e Gallucci *et al.* (2007), a desvantagem deste método é que a resolução espacial utilizada influencia na captação dos dados, isto é, poros menores que a resolução aplicada não são visualizados o que pode tornar a porosidade subestimada.

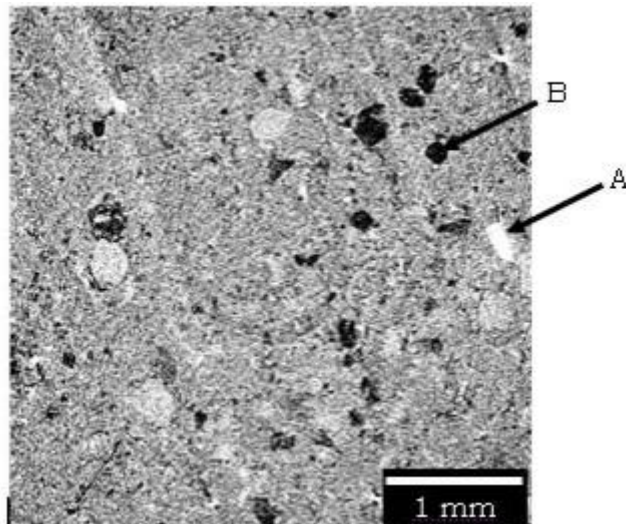
Outro problema relatado por Gallucci *et al.* (2007) diz respeito a dificuldade de preparação das amostras, devido a necessidade de serem pequenas para que a resolução utilizada identifique os poros, o que dificulta garantir a sua homogeneidade. Eles observaram que em determinadas amostras a compacidade da massa diminuiu a partir do centro em direção as paredes do tubo, enquanto outras amostras estavam mais homogêneas. Quanto maior a amostra mais longos seriam os tempos para aquisição de dados e também haveria uma transmissão mais baixa de raios-X, o que conseqüentemente causaria problemas de atenuação.

Segundo Mattana e Costa (2011), a ação do microtomografo de raios-X “baseia-se na propriedade dos materiais absorverem esta radiação de forma diferenciada dependendo de sua composição química e densidade”.

Ao analisar uma fotomicrotomografia mostrando a ocorrência dos poros, observa-se que pontos mais claros evidenciam áreas mais densas, isto é, com coeficientes de atenuação maiores e pontos mais escuros mostram locais menos densos com coeficientes de atenuação menores (FERNANDES, 2009),

conforme Figura 4.

**Figura 4** – Fotomicrotomografia indicando a ocorrência de poros para uma amostra de Siltito (rocha sedimentar)

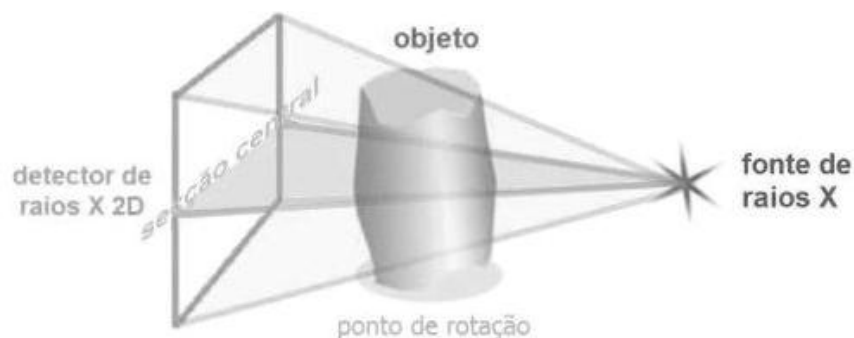


**Fonte:** Fernandes, (2009)

Assim, segundo Fernandes (2009), a seta A indica um ponto mais denso enquanto a seta B indica um poro.

A captação dos dados inicia-se com a colocação da amostra em um suporte, porta-amostras, que gira em um eixo vertical, conforme Figura 5.

**Figura 5** - Esquema de aquisição de imagens do micro-CT



**Fonte:** adaptado de SkyScan (2005) *apud* Maurício *et al.*(2012)

Conforme as radiografias são obtidas, o objeto de estudo é dividido virtualmente em “fatias”, quanto mais radiografias retiradas da amostra melhor a qualidade e resolução da micro-CT, exemplificado na Figura 6.

A reconstrução do elemento em 3D é feita a partir das projeções em

2D adquiridas em vários ângulos em torno do seu eixo de rotação.

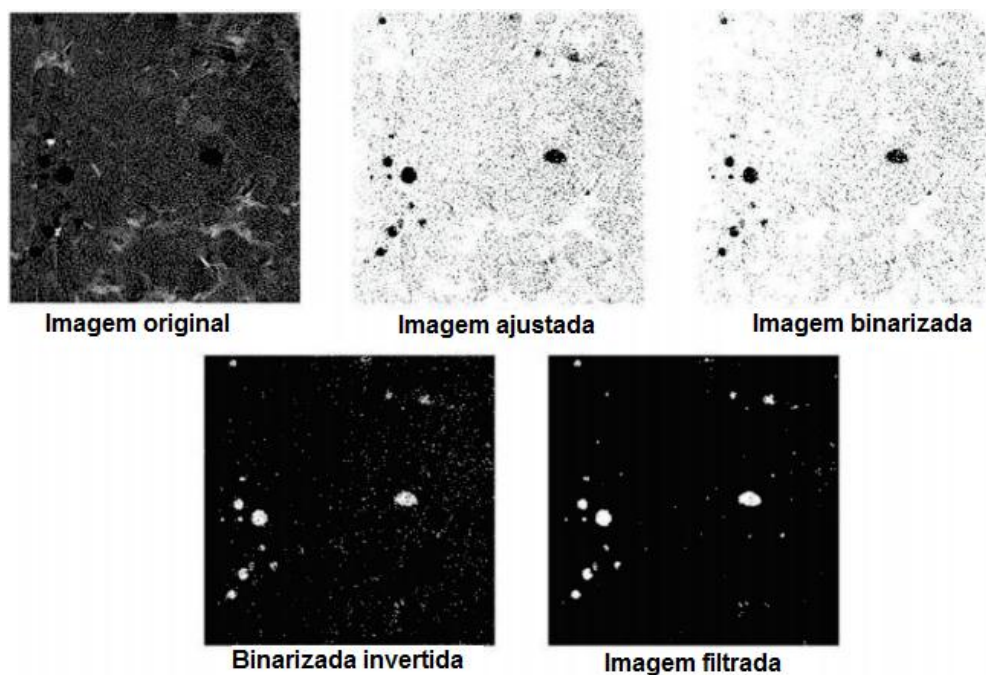
**Figura 6** – Reconstrução de uma amostra conforme a quantidade de radiografias



Fonte: adaptado de SkyScan (2005) *apud* Maurício *et al.*(2012)

Depois se faz “a reconstrução do objeto, transformação das imagens originais em imagens binárias válidas, definição dos volumes de interesse a estudar e cálculo de parâmetros” (MAURÍCIO *et al.*, 2012). E por fim, a análise da estrutura e textura das amostras, conforme demonstrado na Figura 7.

**Figura 7** – Etapas de processamento de imagens obtida através de microtomografia de raios-X



Fonte: adaptado de Pessoa *et al.*, 2014

Rattanasak e Kendall (2005) em seu estudo da estrutura dos poros de uma pasta cimentícia com relação água/cimento de 0,25 e 1% de superplastificante, encontraram o valor de porosidade de 1,36%. O micro-CT

utilizado possuía resolução de 5  $\mu\text{m}$ .

Segundo Mattana e Costa (2011) a porosidade total encontrada utilizando resolução de 7  $\mu\text{m}$  para pastas de CP II F e CP V foi de 4,1% e 2,4%, respectivamente.

Maurício *et al.* (2012) obtiveram para uma argamassa de base cimentícia com traço de 1:5 (cimento/agregado) e micro-CT com resolução de 10  $\mu\text{m}$  uma porosidade total de 15%.

A redução da porosidade e, conseqüentemente, o aumento do coeficiente de atenuação de radiação de um material é decorrente do refinamento da estrutura. Sabe-se que para blindar a radiação de forma mais eficiente possível deve-se ter um material pesado e com elementos de números atômicos maiores possíveis, e é neste contexto que surge a argamassa pesada (BITELLI, 1982).

### 2.3 COMPACIDADE

O uso de agregados nas argamassas e concretos não serve apenas como redução de custo de produção e preenchimento de volume. Um maior empacotamento dos grãos proporciona aos concretos e argamassas pequenos volumes de vazios, o que diminui a quantidade de pasta necessária para efetuar o preenchimento entre os grãos, melhora a trabalhabilidade e aumenta a compactidade. Com isto, necessita-se de menos água na mistura, tem-se uma menor relação água/cimento implicando numa maior resistência dos concretos e argamassas (KWAN; MORA, 2001).

Este refinamento granular pode ser útil quando se deseja formular argamassas pesadas, pois ao compor granulometricamente uma estrutura visando a sua maior densidade contribui-se para que este material atenua a radiação de forma mais eficiente, necessitando de menor espessura para blindar uma mesma energia se comparado com uma argamassa mais porosa (JENKINS *et al.*, 1981 apud PIRES, 2006).

A granulometria dos agregados afeta as propriedades da argamassa tanto no estado fresco como no endurecido (JAMKAR; RAO, 2004;

MOSTOFINEJAD; REISI, 2012).

Ao compor granulometricamente os agregados de uma argamassa se devem preservar as características no estado fresco, como trabalhabilidade, consistência, plasticidade e retenção de água, e certificar que no estado endurecido tenha “uma compacidade elevada, com redução do volume de vazios” (CARNEIRO, 1999).

A granulometria da areia contribui para o desempenho das argamassas juntamente com a dimensão máxima e a forma dos grãos, já que influencia no preenchimento de vazios e conseqüentemente em suas propriedades (CARNEIRO; CINCOTTO, 1999).

Bonin *et al.* (1999) observaram em seu trabalho com areias para argamassa, com diferentes composições granulométricas, que “um elevado teor de finos em areias uniformes eleva consideravelmente o consumo de água para atingir uma determinada trabalhabilidade”. Em areias desuniformes o alto teor de finos não elevou o consumo de água.

Já para Carneiro (1999), “se a distribuição granulométrica não for contínua, a argamassa terá maior índice de vazios, necessitando de maior quantidade de aglomerante e de água de amassamento” para obter a mesma trabalhabilidade se comparado com uma areia contínua.

Segundo Tristão e Roman (1995) e Carneiro (1999), caracterizar as areias pelo módulo de finura não representa corretamente a sua distribuição granulométrica, pois areias com módulos iguais podem ter composições granulométricas diferentes.

Assim sendo, dosar concomitantemente a argamassa pela sua curva granulométrica e módulo de finura é o que melhor caracteriza a areia a ser utilizada na produção da argamassa (CARNEIRO *et al.*, 1997).

Jamkar *et al.* (2004) afirmam que com relação ao formato e a textura, os agregados que possuem uma superfície mais áspera e formato mais angular possuem mais vazios do que os que tem textura lisa e formato arredondado. Sendo assim, o concreto e a argamassa necessitam de mais água para ter trabalhabilidade.

Tristão (1995), em seu trabalho estudou a influência da composição granulométrica nas propriedades das argamassas de revestimentos com areias de diferentes granulometrias. Após ensaiar dez areias diferentes, ele verificou que a

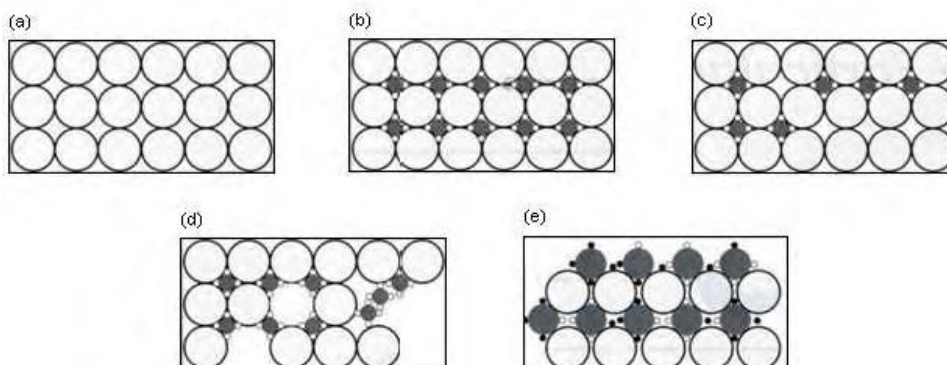
areia obtida a partir dos estudos de Fuller e da norma francesa do CSTB DTU 26.1/1978 (Centre Scientifique e Technique du Batiment) apresentaram as maiores massas unitárias de  $1,735 \text{ g/cm}^3$  e  $1,654 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente.

A areia da CSTB é uma areia mais fina que a de Fuller, pois aproximadamente 6% de sua granulometria fica retida na peneira 2,4 mm enquanto na de Fuller aproximadamente 50% ficou retida na peneira 2,4 mm. Conseqüentemente a areia francesa, por conter menores proporções de grãos grossos, apresenta maior facilidade de aplicação e acabamento para utilização em uma argamassa de revestimento.

Kwan e Fung (2009), em seu trabalho verificaram o empacotamento do agregado miúdo de granito, as frações analisadas foram: 0,075 mm, 0,150 mm, 300 mm e 600 mm. Eles chegaram à conclusão que uma fração de tamanho menor tende a ter um maior aumento da densidade de empacotamento quando compactada. Isso ocorre porque a fração de menor tamanho tende a ficar aglomerada e quando compactada ocorre um rearranjo das partículas.

O empacotamento máximo se dá quando os vazios maiores dos materiais são preenchidos por partículas menores, os novos vazios formados são preenchidos por partículas ainda menores que as anteriores e assim sucessivamente, conforme pode ser visualizado na Figura 8 (ORTEGA *et al.*, 1997; CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

**Figura 8** – Empacotamento – influencia do tamanho e quantidade de partículas: (a) mínimo empacotamento; (b) máxima empacotamento; (c) falta de partículas pequenas; (d) falta de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas



**Fonte:** Roy, Scheetz e Silsbee (1993) *apud* Oliveira (2013)

Ao longo dos anos foram criados diversos modelos de empacotamento visando a máxima densidade dos compósitos, dentre os mais

conhecidos estão os modelos de Furnas, de Andreassen e de Alfred – também conhecido como Andreassen modificado (ORTEGA *et al.*, 1997; CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

O modelo de Furnas possui uma abordagem discreta, isto é, considera as partículas individualmente e não como uma distribuição (DINGER E FUNK, 1994 *apud* ORTEGA *et al.*, 1997).

Já no modelo de Andreassen as partículas são abordadas como distribuições contínuas e possuem um valor  $q$  que é o módulo de distribuição. Neste modelo não se considera um tamanho mínimo de partícula e o valor  $q$  que proporciona o máximo empacotamento deve estar entre 0,33 e 0,50 (DINGER; FUNK, 1994 *apud* SILVA *et al.*, 2004).

Ao considerar um sistema real verifica-se a necessidade de um modelo de empacotamento que considere as distribuições de forma contínua e um valor mínimo de tamanho de partícula, assim surge o modelo de Alfred que é um aperfeiçoamento do modelo de Andreassen e de Furnas (DINGER; FUNK, 1994 *apud* ORTEGA *et al.*, 1997; CASTRO *et al.*, 2009).

O modelo de Alfred, ou também conhecido como Andreassen modificado, considera como valor  $q$  que proporciona o máximo empacotamento igual a 0,37 (DINGER; FUNK, 1994 *apud* ORTEGA *et al.*, 1997).

Segundo Ortega *et al.* (1997) por englobar um valor mínimo da partícula o modelo de Alfred se adequa bem aos sistemas reais, sendo assim é considerado o mais apropriado dos modelos de empacotamento e acredita-se que o modelo de Furnas é o menos eficaz (SILVA *et al.*, 2004).

Desta forma, ao otimizar o esqueleto granular tornando-o mais compacto se reduzem os vazios, diminui-se a porosidade e a estrutura se torna mais densa com maior capacidade de absorver radiação.

#### 2.4 ARGAMASSA PESADA

A argamassa pesada, assim como a argamassa convencional, é um composto de aglomerante, agregado e água, podendo ou não ter também em sua composição a incorporação de aditivos e adições, a diferença básica é que esta é produzida com a utilização de agregados pesados, naturais ou artificiais (CARASEK,

2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto pesado, da mesma forma que a argamassa pesada, absorve os nêutrons pelo teor de hidrogênio presentes nos hidratos de cimento. Assim, podem ser utilizados como materiais protetores contra radiação (MEHTA; MONTEIRO, 2014; GENCEL *et al.*, 2011; TOPÇU, 2003).

Usinas nucleares e unidades médicas são alguns dos locais onde se podem utilizar argamassas e concretos pesados com a finalidade de obter a blindagem contra a radiação (BICINI *et al.*, 2014).

Enquanto a massa específica das argamassas normais varia de 1400 a 2300 kg/m<sup>3</sup>, a massa específica da argamassa com agregados pesados é maior que 2300 kg/m<sup>3</sup> (CARASEK, 2010).

Sendo assim, pode-se dizer que a massa específica dos agregados contribui na elevação da massa específica da argamassa. No Quadro 5 se apresentam alguns agregados com a respectiva composição química e massas específicas e unitárias.

**Quadro 5 – Composição e massa específica de agregados pesados**

Tipo de agregado	Composição química do mineral principal	Massa específica do mineral puro (kg/m <sup>3</sup> )	Massa unitária típica (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Waterita</b>	BaCO <sub>3</sub>	4290	2320
<b>Barita</b>	BaSO <sub>4</sub>	4500	2560
<b>Magnetita</b>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5170	2720
<b>Hematita</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4900 – 5300	3040
<b>Lepidocrocita</b>	Óxido de ferro hidratados contendo de 8 a 12% de água	3400 – 4000	2240
<b>Geotita</b>			
<b>Limonita</b>			
<b>Ilmenita</b>	FeTi O <sub>3</sub>	4720	2560
<b>Fosfetos de ferro</b>	Fe <sub>3</sub> P, Fe <sub>2</sub> P, FeP	5700 – 6500	3680
<b>Agregados de aço</b>	Fe	7800	4480

Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Segundo Topçu (2003) e Mehta e Monteiro (2014), ao usar agregados pesados para produção de concretos e argamassas deve-se cuidar para não haver segregação. Para prevenir isto a mistura dos componentes deve ser feita da forma mais rápida possível e no caso do concreto, é necessário à utilização de agregados finos.

Além dos agregados do Quadro 5, autores como González-Ortega *et al.* (2014) e Maslehuddin *et al.* (2013) realizaram estudos com a a escória de aciaria FEA como agregado pesado e encontraram valores de massa específica variando de 3310 a 3570 kg/m<sup>3</sup> e 3510 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

#### 2.4.1 Argamassa Baritada

A argamassa baritada é um material comercialmente vendido e usado como revestimento de superfícies sujeitas à radiação ionizante.

É muito utilizada como alternativa aos lençóis de chumbo pelo seu custo mais baixo e facilidade de aplicação, sem necessidade de mão de obra especializada.

De acordo com Barros e Macioski (2014) é composta pelos materiais conforme Tabela 1.

**Tabela 1** – Materiais componentes da argamassa baritada

<b>Componentes</b>	<b>Porcentagem</b>
Areia quartzosa	57,12%
Sulfato de bário bruto	28,56%
Catalizador	14,28%
Fibra de vidro	0,04%

**Fonte:** Barros e Macioski (2014)

Possui densidade de 3200 kg/m<sup>3</sup> e cor marrom escuro sendo fornecida pronta para o uso, apenas deve ser adicionada água a mistura no momento da aplicação. “Pode ser aplicada em paredes, teto, piso e em superfícies como alvenaria, gesso acartonado, “dry-wall”, tijolo de gesso, placa de cimento e amianto” (GRX, 2014a).

Com relação às características físicas e mecânicas da argamassa baritada, na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos por Barros e Macioski (2014).

**Tabela 2** – Características físicas e mecânicas da argamassa baritada

Características	Argamassa baritada
Índice de consistência (cm)	25,20
Massa específica – em fresco (g/cm <sup>3</sup> )	2,24
Absorção total (%)	11,00
Índice de vazios (%)	23,00
Resistência à compressão (MPa)	4,61
Resistência à tração (MPa)	1,73
Densidade – estado endurecido (g/cm <sup>3</sup> )	2,05
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	9,40

**Fonte:** adaptado de Barros e Macioski (2014).

Conforme a Tabela 2, verifica-se que a argamassa baritada possui uma massa específica que pode ser classificada, segundo Carasek (2010), como uma argamassa normal e não pesada. A densidade obtida por Barros e Macioski (2014) é inferior à densidade apresentada pelo fabricante, de 3200 kg/m<sup>3</sup>, assim esta argamassa baritada pode não atenuar efetivamente atenuação.

Considerando que este trabalho baseia-se na formulação de argamassas pesadas com escória de aciaria FEA e barita são apresentados na revisão bibliográfica informações a respeito destes agregados.

## 2.5 A ESCÓRIA DE ACIARIA DE FORNO ELÉTRICO E O AÇO

A escória de aciaria de forno elétrico é um coproduto da produção do aço. Para a fabricação do aço são necessárias quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e lingotamento contínuo, e laminação. Estes quatro estágios podem ocorrer todos em uma mesma usina ou podem ocorrer em usinas diferentes (IABR, 2012).

As usinas siderúrgicas podem ser divididas em: integradas, semi-integradas e não integradas. Sendo esta classificação dada pelo processo de produção do aço.

As usinas integradas são aquelas em que o minério de ferro é reduzido em um alto-forno, e são acrescentadas outras matérias-primas como:

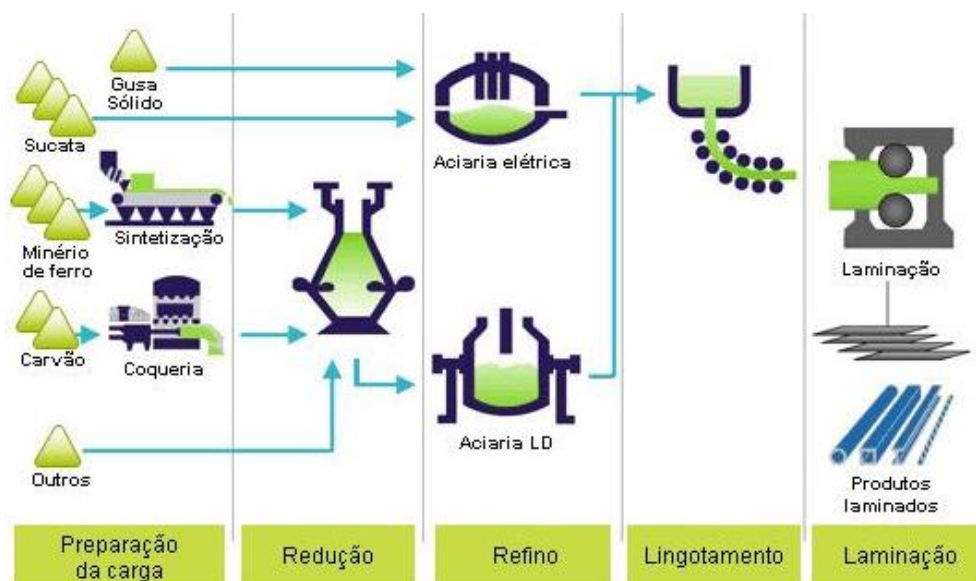
minério de manganês, carvão vegetal e calcário. O ferro-gusa (líquido) resultante deste forno, após a redução, é refinado em um conversor a oxigênio (aciarias LD) e está pronto para as etapas de lingotamento e laminação. Se necessário, pode ser feito um refino secundário em um forno panela para se ajustar a composição química e temperatura pretendidas. Sendo assim, nestas usinas são obtidas as escórias de aciarias LD (IABR, 2012).

Já nas usinas semi-integradas, funde-se o ferro-gusa com sucatas metálicas e o refino é feito em um forno elétrico. Se necessário, pode ser feito o refino secundário em forno panela. Nestas usinas são obtidas as escórias de aciaria de forno elétrico (IABR, 2012).

As usinas não integradas não produzem aço, apresentam somente a etapa redução ou processamento (IBS, 2013).

A Figura 9 exemplifica as etapas necessárias à fabricação do aço bruto.

**Figura 9** - Fluxo simplificado de produção de aço bruto



Fonte: IABR, 2013

Na produção do aço se pode obter a escória de aciaria através das duas principais formas de fabricação:

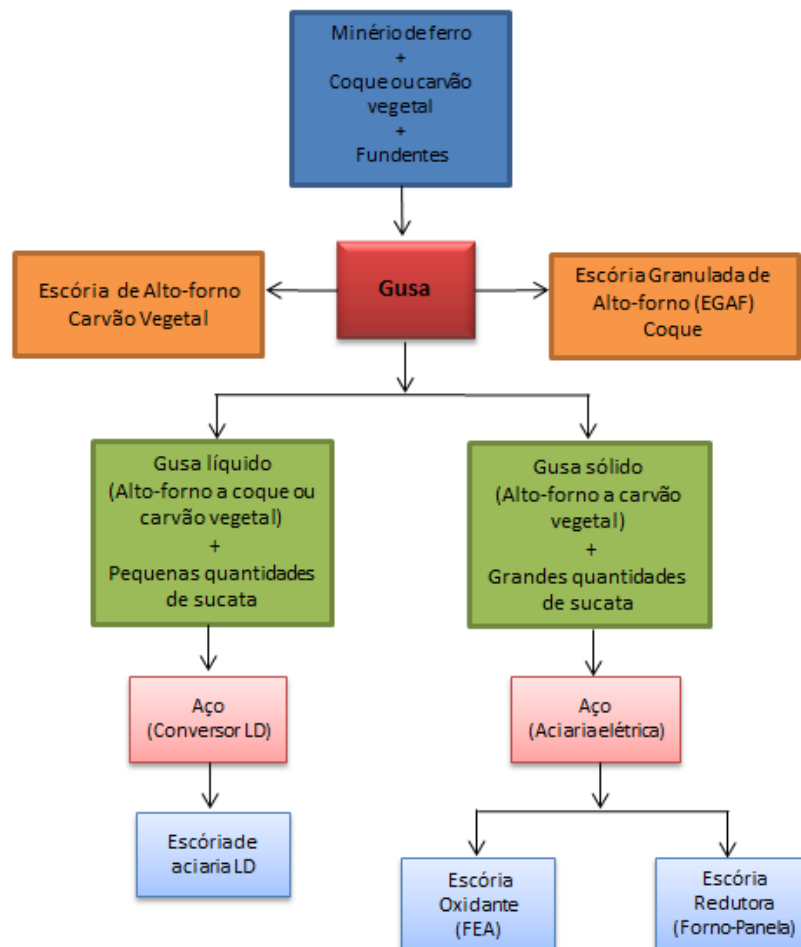
- Forno elétrico a arco (FEA) - a sucata metálica é convertida em aço através de fusão e refino em um forno elétrico a arco. Este tipo de forno dá origem às escórias de aciaria de forno elétrico.

- Conversor LD (Linz-Donawitz) - o ferro-gusa (líquido) transforma-se em aço em um conversor LD. Deste tipo de forno saem às chamadas escórias de aciaria LD.

A escória de aciaria de forno elétrico (FEA) tem em sua composição um maior teor de material impuro, como Cr, Ni, Cu, Sn, e Mn se comparada com uma escória de aciaria LD. Isto ocorre devido ao fato de que na fabricação do aço na aciaria elétrica são utilizadas sucatas metálicas. Conforme os componentes químicos empregados e o tipo de resfriamento utilizado, têm-se escórias com características diferentes (POLISSENI, 2005).

A Figura 10 apresenta um fluxograma da produção do ferro-gusa, produção do aço e das correspondentes escórias.

**Figura 10** - Produção do ferro-gusa, produção do aço e das correspondentes escórias



Fonte: modificado de POLISSENI, 2005

O Brasil é considerado um dos maiores produtores mundiais de aço. No ano de 2013, evidenciou-se como o nono maior produtor mundial (WSA, 2014).

A Tabela 3 apresenta a produção de aço bruto, conforme os principais grupos mundiais.

**Tabela 3** - Produção mundial de aço bruto em 2013

Grupos	Produção (x10 <sup>3</sup> t)
Alemanha	42.641
<b>União Europeia (27)</b>	<b>165.601</b>
Turquia	34.658
<b>Outros países europeus</b>	<b>36.606</b>
Rússia	69.402
Ucrânia	32.824
<b>C.E.I. (6)</b>	<b>108.741</b>
Canadá	12.460
E.U.A.	86.955
<b>América do Norte</b>	<b>119.251</b>
Brasil	34.178
<b>América do Sul</b>	<b>46.023</b>
<b>África</b>	<b>15.687</b>
<b>Oriente Médio</b>	<b>25.888</b>
China	779.040
Coréia do Sul	66.008
Índia	81.213
Japão	110.570
<b>Ásia</b>	<b>1.059.151</b>
<b>Oceania</b>	<b>5.545</b>
<b>Total 65 países</b>	<b>1.582.493</b>

Fonte: adaptado de WSA (2014)

Na América do Sul, o Brasil é o principal produtor de aço, tendo fabricado, no ano de 2013, aproximadamente, 75% do total deste grupo (WSA, 2014).

Em 2013, o estado brasileiro que mais produziu aço foi o de Minas Gerais com 33,7% seguido do Rio de Janeiro com 29,9%. Os outros 25 estados correspondem a 36,4% da produção nacional (IABR, 2014).

Da produção de 2013, 25,6 milhões de toneladas foram fabricadas através do processo de aciaria a oxigênio (LD) e 8,6 milhões de toneladas pelo processo de aciaria de forno elétrico (IABR, 2014).

Em 2012, na produção de 34,52 milhões de toneladas de aço bruto, gerou-se 17,7 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos, sendo, 63% do total de agregados siderúrgicos, 13% de pós e finos, 6% de lamas e 18% de outros. As aplicações para os agregados siderúrgicos foram: 69,9% para cimento, 18% para base de estradas, 7,7% para nivelamento de terreno, 2,2% para uso agrônômico, 0,2% para lastro ferroviário (IABR, 2013).

Com relação às características físicas das escórias de aciaria FEA, no Quadro 6 são apresentados os resultados obtidos por alguns autores.

**Quadro 6** - Características físicas das escórias de aciaria FEA conforme alguns autores

Autor	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Teor material pulverulento (%)	Absorção de água (%)
Pellegrino <i>et al.</i> (2013)	3,78	-	-	1,61
González-Ortega <i>et al.</i> (2014)	3,30	-	-	2,47
Fontana <i>et al.</i> (2013)	3,60	2,15	2,78	2,17
Maslehuddin <i>et al.</i> (2003)	3,51	-	-	0,85
Manso <i>et al.</i> (2004)	3,50	1,60	-	0,30 – 0,90

**Fonte:** da autora.

Verifica-se que as massas específicas encontradas pelos autores González-Ortega *et al.* (2014), Fontana *et al.* (2013), Maslehuddin *et al.* (2003), Pellegrino *et al.* (2013) e Manso *et al.* (2004), encontram-se na mesma faixa de valores. Com relação à absorção de água, nota-se que o teor encontrado por González-Ortega *et al.* (2014) é superior ao encontrado pelos outros autores, isto pode ser devido a matéria prima utilizada na produção do aço, que gera a escória de aciaria (FEA). Como se utiliza sucata metálica na produção aço pode haver uma grande variabilidade em sua composição química.

Assim, na produção da argamassa com finalidade de absorção de radiação devem-se utilizar agregados pesados. Neste contexto, a barita pela sua elevada massa específica pode ser usada como agregado para proteção radiológica e a sua combinação com a escória pode ser uma alternativa econômica e ecológica.

## 2.6 A BARITA

O sulfato de bário (BaSO<sub>4</sub>), barita, quando pura tem densidade em torno de 4500 kg/m<sup>3</sup>, composta de aproximadamente 58% de Bário (Ba) e

considerada o mineral com maior densidade entre os minerais não metálicos (LUZ E LINS, 2005; COELHO, 2009).

Autores como Mostofinejad *et al.* (2012), Frimaio (2006) e Akkurt *et al.* (2012) obtiveram o valor de aproximadamente 4000 kg/m<sup>3</sup> para a densidade da barita.

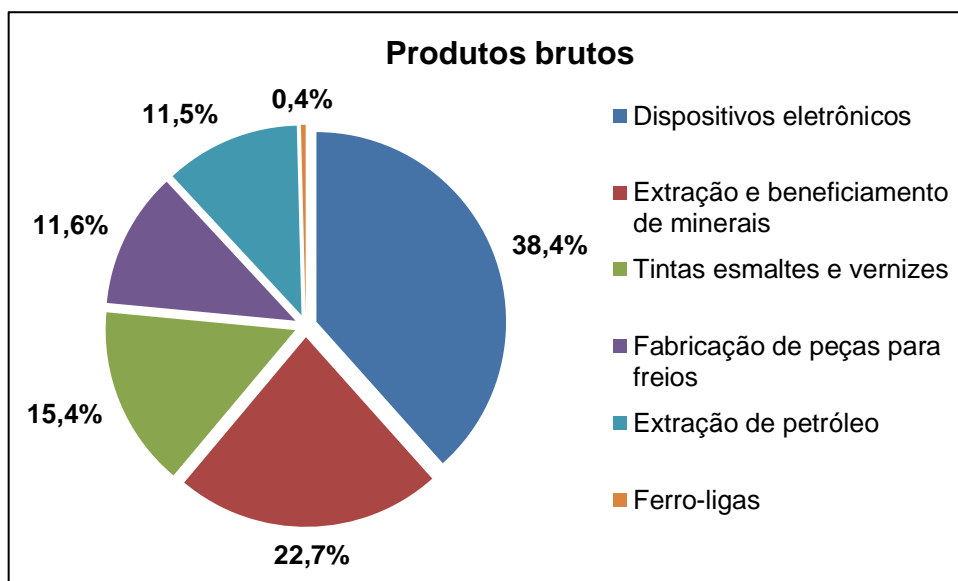
A barita possui cor branca ou cinza claro, se livre de impurezas e cor variando do cinza escuro ao rosa, quando possui em sua composição matéria carbonosa e óxido de ferro (BRASIL, 2001).

Os maiores produtores mundiais de barita são a China, a Índia e os EUA. No ano de 2012, a China teve uma produção de 4 milhões de toneladas o que equivaleu a 46,8% da produção mundial, a Índia produziu aproximadamente 1,4 milhão de toneladas (16,4%) e os EUA produziram 654 mil toneladas (7,7%). A produção do Brasil correspondeu a 2,2% da produção mundial, isto é, 186 mil toneladas (USGS, 2013 *apud* BRASIL, 2013).

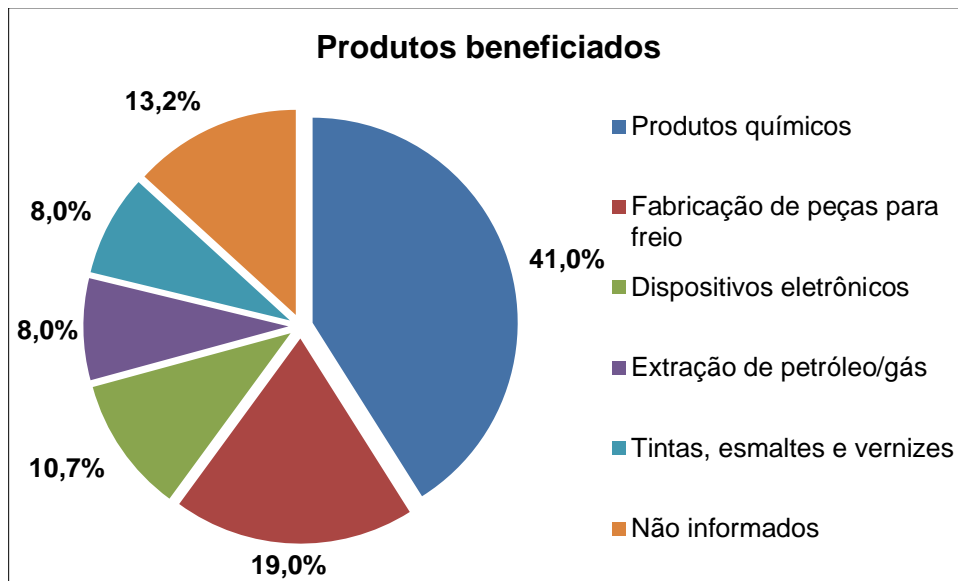
O estado de Goiás é o que mais produz barita, sendo responsável por 80% da produção de barita beneficiada (BRASIL, 2013).

No ano de 2012, o consumo de barita no Brasil se deu na forma de produtos brutos e beneficiados, conforme Gráfico 3 e 4, respectivamente.

**Gráfico 3** - Consumo de barita na forma de produtos brutos no ano de 2012



Fonte: Brasil (2013)

**Gráfico 4 - Consumo de barita na forma de produtos beneficiados no ano de 2012**

Fonte: Brasil (2013)

Outro uso da barita é como atenuadora de radiação, pois possui propriedades como elevada “densidade, durabilidade e transferência de calor” (BRASIL, 2001).

A massa específica do agregado pesado contribui até certo ponto para o aumento da massa específica da argamassa e, como não se consegue alterar a massa específica de um agregado, é preciso fazer o refinamento da estrutura da pasta e do esqueleto granular para obter argamassas mais compactas.

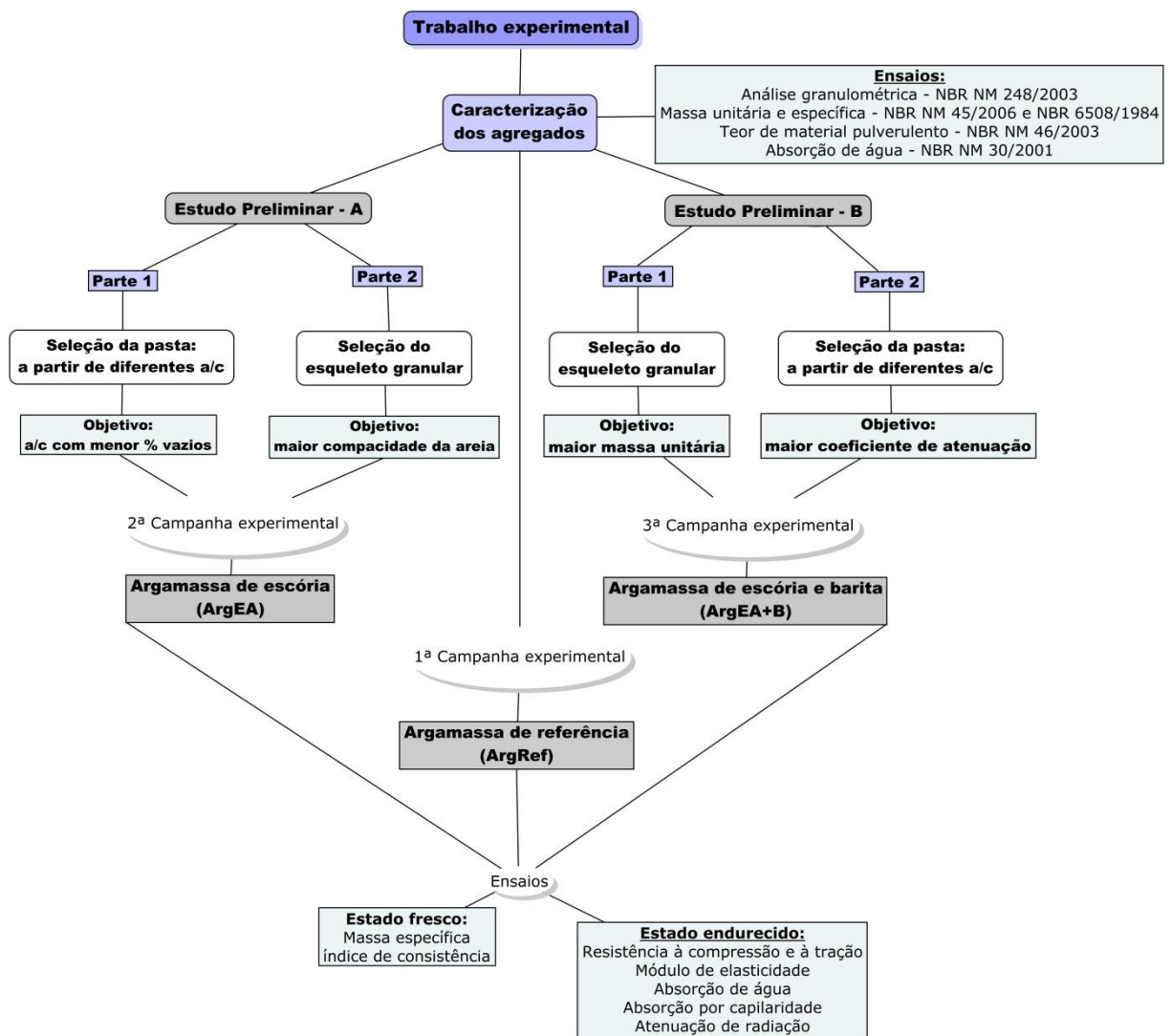
Partindo deste princípio é necessário obter pastas cimentícias com a menor porcentagem de poros vazios e areias com a maior compactidade possível.

A partir do exposto na revisão bibliográfica, justifica-se o trabalho experimental apresentado no próximo capítulo.

### 3 TRABALHO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental consistiu em produzir três argamassas: a de referência, de escória de aciaria de forno elétrico (FEA) e a combinação de escória de aciaria FEA e barita, conforme demonstrado no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma do trabalho experimental



Fonte: da autora.

Como pré-requisito para a dosagem das argamassas foi necessário, primeiramente, através de estudos preliminares, determinar a pasta que apresentava a menor porosidade e o esqueleto granular com o maior empacotamento de partículas.

A porosidade, massa específica e a composição granulométrica, determinam as propriedades do concreto e das argamassas no estado fresco, desta forma, justificou-se a necessidade de haver um estudo mais amplo sobre essas características das argamassas.

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção da argamassa de escória de aciaria FEA foram:

- Cimento Portland CP II-E-32
- Areia de escória de aciaria FEA;
- Aditivo polifuncional a base de lignosulfonato (Ls);
- Água potável.

Para a produção da argamassa de escória FEA e barita utilizaram-se os mesmos materiais da confecção da argamassa de escória de aciaria FEA, apenas acrescentou-se o pó de barita, como agregado barítico.

A argamassa de referência é uma argamassa baritada comercial (ArgRef) como o material referencial deste trabalho, conforme especificado no Quadro 7. Essa escolha se deu pela dificuldade em conseguir agregado miúdo de barita.

**Quadro 7** – Materiais utilizados na produção das argamassas

	Argamassa de referência (ArgRef)	Argamassa de escória (ArgEA)	Argamassa de escória e barita (ArgEA+B)
Materiais	Argamassa baritada Água	Cimento Portland CP II-E-32 Areia de escória FEA (AE) Água Aditivo polifuncional	Cimento Portland CP II-E-32 Areia de escória FEA (AE) Pó de barita Água Aditivo polifuncional

Fonte: da autora

### 3.1.1 Cimento Portland

Para o estudo em questão foi utilizado o CP II-E-32. Adotou-se este tipo de cimento pela compatibilidade com os agregados de escória de aciaria FEA e também pela disponibilidade na cidade de Londrina/PR.

O Quadro 8 contém as características físicas e mecânicas do cimento Portland CP II-E-32 (cimento Portland tipo II com adição de escória de alto forno).

**Quadro 8** - Características físicas e mecânicas do CP II-E-32

Resistência à compressão (MPa)	CP II -E- 32)
1 dia	-
3 dias	≥ 10,0
7 dias	≥ 20,0
28 dias	≥ 32,0
Adições permitidas (%)	
Escória	6 a 34
Filer calcário	0
Material pozolânico	0
Características físicas	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,02
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	

**Fonte:** adaptado de Cimento Itambé, 2013.

### 3.1.2 Pó de Barita

O pó de barita utilizado neste trabalho é proveniente da empresa Grupo GRX (2014b) e pode ser visualizado na Figura 12.

**Figura 12 -** Pó de barita



**Fonte:** da autora.

### 3.1.3 Agregado de Escória de Aciaria de Forno Elétrico (FEA)

Por motivos de confidencialidade não serão divulgados o local e o nome da empresa fornecedora da escória de aciaria de forno elétrico.

Na Figura 13 visualiza-se a escória de aciaria utilizada como agregado miúdo pesado para a produção das argamassas.

**Figura 13 –** Agregado miúdo siderúrgico de escória de aciaria de forno elétrico



**Fonte:** da autora.

### 3.1.4 Argamassa Baritada

Devido à dificuldade em se conseguir agregados miúdos de barita

para a montagem de uma areia de barita e posterior utilização na formulação de uma argamassa de barita, utilizou neste trabalho, como referência, uma argamassa baritada vendida comercialmente.

Na Figura 14 visualiza-se a argamassa baritada utilizada neste trabalho.

**Figura 14** – Argamassa baritada



**Fonte:** da autora.

### 3.1.5 Aditivo Polifuncional

Utilizou-se como aditivo um redutor de água polifuncional a base de lignosulfonato (Ls) na proporção de 1% em relação a massa de cimento. A escolha deste aditivo foi em função do seu custo/benefício.

### 3.1.6 Água

A água potável usada nos ensaios foi obtida através da rede de água da SANEPAR da cidade de Londrina/PR.

## 3.2 MÉTODO

Este trabalho consistiu em se fazer um comparativo entre uma argamassa de referência (ArgRef) - sendo esta uma argamassa baritada, uma argamassa de escória de aciaria FEA (ArgEA) e uma argamassa com combinação de areia de escória de aciaria FEA e pó de barita (ArgEA+B).

Primeiramente foram realizados dois estudos preliminares denominados A e B, respectivamente.

O Estudo Preliminar A teve dois objetivos: primeiro selecionar a pasta cimentícia com menor porosidade, através de microtomografia de raios – X e correlacionar os resultados deste ensaio com a resistência à compressão, e segundo, selecionar o esqueleto granular (combinação granulométrica do agregado que compõe a argamassa) com o maior empacotamento das partículas através do trabalho de Tristão (1995) e do programa de simulação de empacotamento EMMA. Por meio deste estudo dosou-se a argamassa ArgEA.

No Estudo Preliminar B, produziu-se a argamassa ArgEA+B, sendo o esqueleto granular mais compacto e denso escolhido através de combinações de areia de escória de aciaria FEA e barita, onde utilizou-se como critério a maior massa unitária e o maior coeficiente de atenuação obtido com argamassas produzidas com as areias combinadas e relações a/c de 0,40 e 0,45 (selecionadas a partir do Estudo Preliminar A – Parte 1).

Depois de finalizados os estudos realizaram-se as três campanhas experimentais que conduzem a verificação do objetivo deste trabalho, sendo a 1ª campanha para a argamassa ArgRef, a 2ª para argamassa ArgEA e a 3ª para a argamassa ArgEA+B.

### 3.2.1 Caracterização dos Agregados

O Quadro 9 apresenta os ensaios e as respectivas normas utilizados para caracterizar a areia de escória de aciaria FEA (AE) e a areia de escória de aciaria FEA e barita (AE+B).

**Quadro 9** - Ensaio e respectivas normas para caracterizar a areia de escória de aciaria FEA e a areia de escória de aciaria FEA com barita

Ensaio	Normas
Análise granulométrica	NBR NM 248/2003
Massa unitária	NBR NM 45/2006
Massa específica	NBR 6508/1984
Teor de material pulverulento	NBR NM 46/2003
Absorção de água	NBR NM 30/2001

Fonte: da autora.

### 3.2.2 Estudos Preliminares

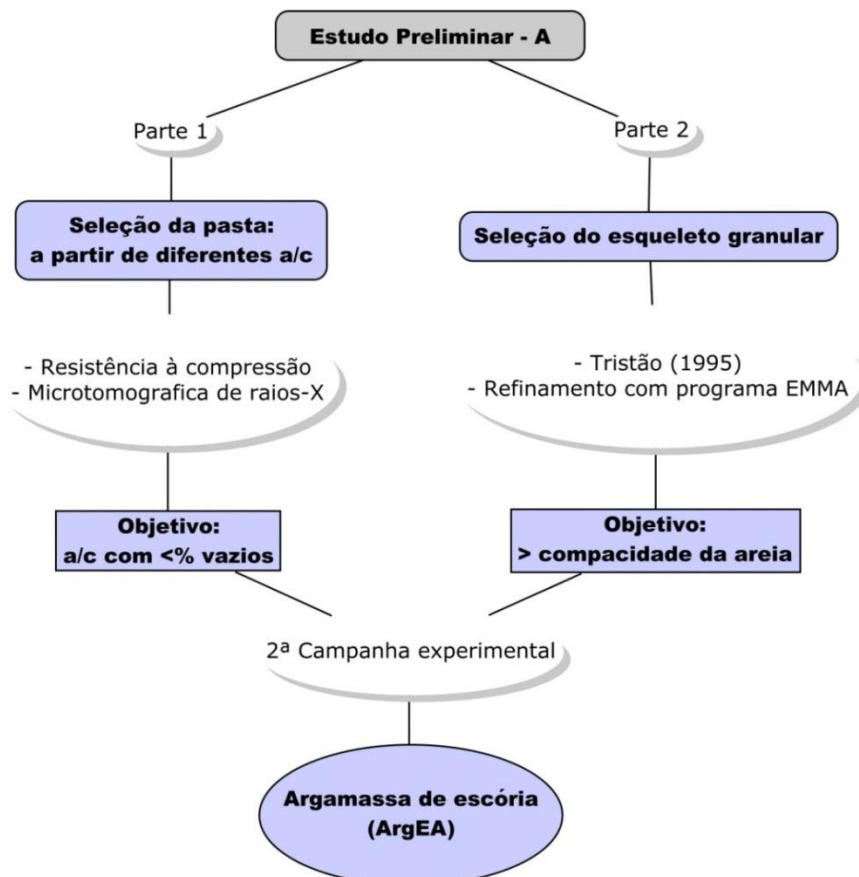
Finalizados os ensaios de caracterização, iniciaram-se os estudos preliminares para subsidiar as dosagens das argamassas de escória de aciaria FEA (ArgEA) e com combinação de escória de aciaria FEA e barita (ArgEA+B).

Para isso foi necessário estabelecer a argamassa com a relação água/cimento que apresentava a menor porosidade e a composição granulométrica com maior empacotamento. Desta forma, com base nesses dois fatores procurou-se dosar a argamassa mais densa.

#### 3.2.2.1 Estudo Preliminar A

Na Figura 15 é apresentado um fluxograma das etapas realizadas neste Estudo Preliminar – A.

**Figura 15** – Fluxograma das etapas realizadas no Estudo Preliminar – A



Fonte: da autora.

Conforme pode ser visualizado na Figura 15, o Estudo Preliminar - A foi dividido em Parte 1 e Parte 2.

### 3.2.2.1.1 Parte 1 - Seleção da pasta

Na Parte 1 escolheu-se a pasta que continha a menor porcentagem de vazios. Para isso foram testadas diferentes relações água/cimento, com e sem aditivo polifuncional. O ensaio foi realizado em corpos de prova de dimensão de 10x10x30 mm, compostos pela mistura de cimento Portland (CP II-E-32) e água, conforme Quadro 10.

**Quadro 10** - Relações água/cimento para verificação da porosidade da pasta

Relação água/cimento	Sem plastificante	Com plastificante
	0,40	0,35
	0,45	0,40
	0,50	0,45

**Fonte:** da autora.

A porosidade das pastas foi mensurada com o auxílio de um microtomógrafo computadorizado de raios-X (micro-CT), através de ensaio realizado no Lab uTM (Laboratório de Microtomografia por Raios X) do departamento de Física Nuclear da Universidade Estadual de Londrina.

A amostra foi colocada no porta-amostras do equipamento e uma fonte de raios-X foi emitida de forma a tirar diversas radiografias do objeto analisado. Estas radiografias bidimensionais (2D) foram reunidas criando assim um elemento reconstruído em 3D. Depois foi feita a análise da estrutura e da textura das amostras, sendo a resolução utilizada no ensaio de 8  $\mu\text{m}$ . Assim, com esse procedimento pode-se medir e quantificar os poros presentes na amostra.

Na Figura 16 pode-se visualizar o micro-CT, da marca Bruker e modelo SkyScan 1172, usado para estimar a porosidade.

**Figura 16** – a) Aparelho de micro-CT SkyScan 1172 b) Posicionamento da amostra de pasta no aparelho



**Fonte:** da autora.

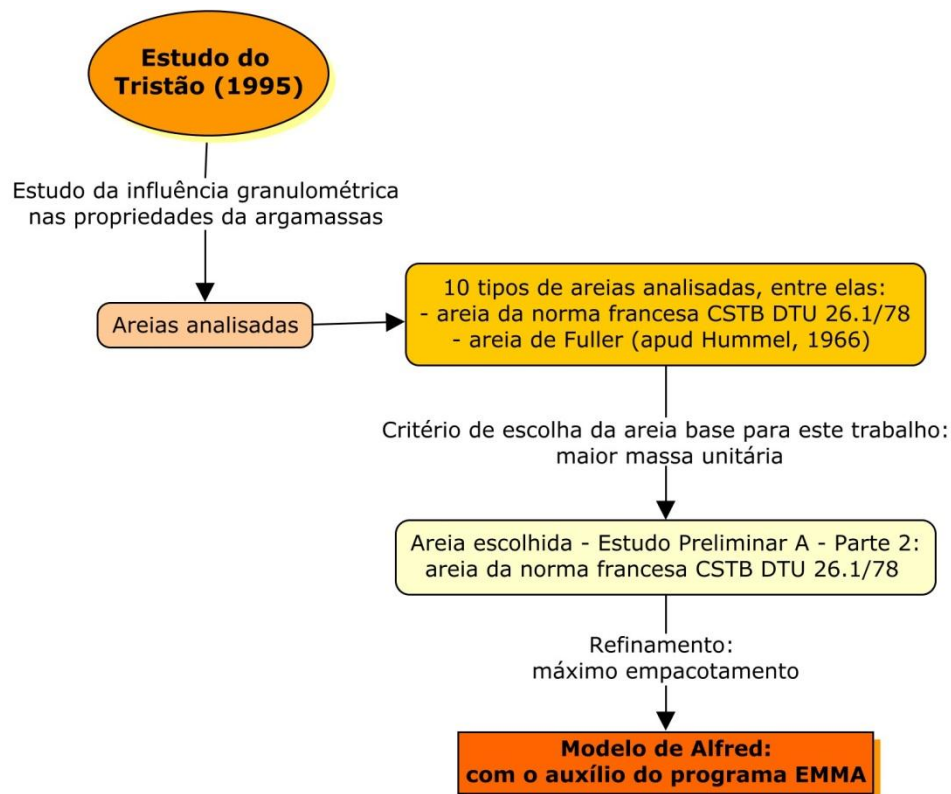
### 3.2.2.1.2 Parte 2 - Seleção do esqueleto granular da areia de escória de aciaria FEA

Na Parte 2, selecionou-se o esqueleto granular, isto é, a combinação das frações granulométricas do agregado, com o intuito de obter a areia de escória de aciaria FEA (AE) para produção da argamassa com o maior empacotamento e maior compactidade.

A composição granulométrica da areia AE foi baseada inicialmente na areia da norma francesa CSTB DTU 26.1/78 obtida no trabalho de Tristão (1995). O critério de escolha desta areia para servir como base para este trabalho foi que, no referido estudo, a areia da norma francesa apresentou a segunda maior massa unitária perdendo somente para a areia de Fuller, que por ser muito grossa inviabilizava sua utilização em argamassa de revestimento.

Na Figura 17 é apresentado um fluxograma para maior entendimento das etapas realizadas para selecionar o esqueleto granular da Parte 2.

**Figura 17** – Fluxograma das etapas realizadas para selecionar o esqueleto granular da Parte 2



Fonte: da autora.

Na Tabela 4 apresenta-se a composição granulométrica da areia estabelecida pela CSTB DTU 26.1/78 usada no trabalho de Tristão (1995).

**Tabela 4** - Composição granulométrica da areia estabelecida pela norma do CSTB DTU 26.1/78, porcentagem retida (adaptado de Tristão, 1995)

Peneira (mm)	2,36	1,18	0,60	0,30	0,150	0,075	<0,075
CSTB DTU 26.1/78 (%)	6	18	17	17	17	10	15

Fonte: adaptado de Tristão (1995).

Utilizando-se dos percentuais granulométricos da areia estabelecida pela norma do CSTB optou-se por refinar ainda mais a distribuição granulométrica com o objetivo de se alcançar o máximo empacotamento possível das partículas.

Para tanto, escolheu-se o modelo de empacotamento de Alfred, pois segundo Oliveira *et. al.* (2000 *apud* Castro *et al.*, 2009) este modelo estabelece distribuições com empacotamentos mais eficientes e, conseqüentemente, maiores densidades se comparado, por exemplo, ao modelo de Andreassen.

Com o intuito de facilitar o refinamento granulométrico usou-se o programa EMMA - Elkem Materials Mix Analyzer (2012), que é um *software* que auxilia na dosagem de concretos otimizando a distribuição granulométrica dos agregados de forma a obter o máximo empacotamento do composto. Ele é baseado nos modelos de Andreassen e de Alfred, onde o usuário pode escolher o modelo que mais convém ao simular o empacotamento das partículas.

No *software* foi feito o refinamento granulométrico da areia CSTB e também da composição cimento e areia CSTB. Para isto, primeiro foi necessário cadastrar todos os materiais utilizados na dosagem da argamassa na biblioteca do programa.

Conhecer a curva granulométrica completa de cada material utilizado na argamassa foi de extrema importância, por isso, que se realizou o ensaio de granulometria a laser com o cimento, por exemplo. Quanto mais completa a curva granulométrica mais confiável se torna o empacotamento simulado pelo programa.

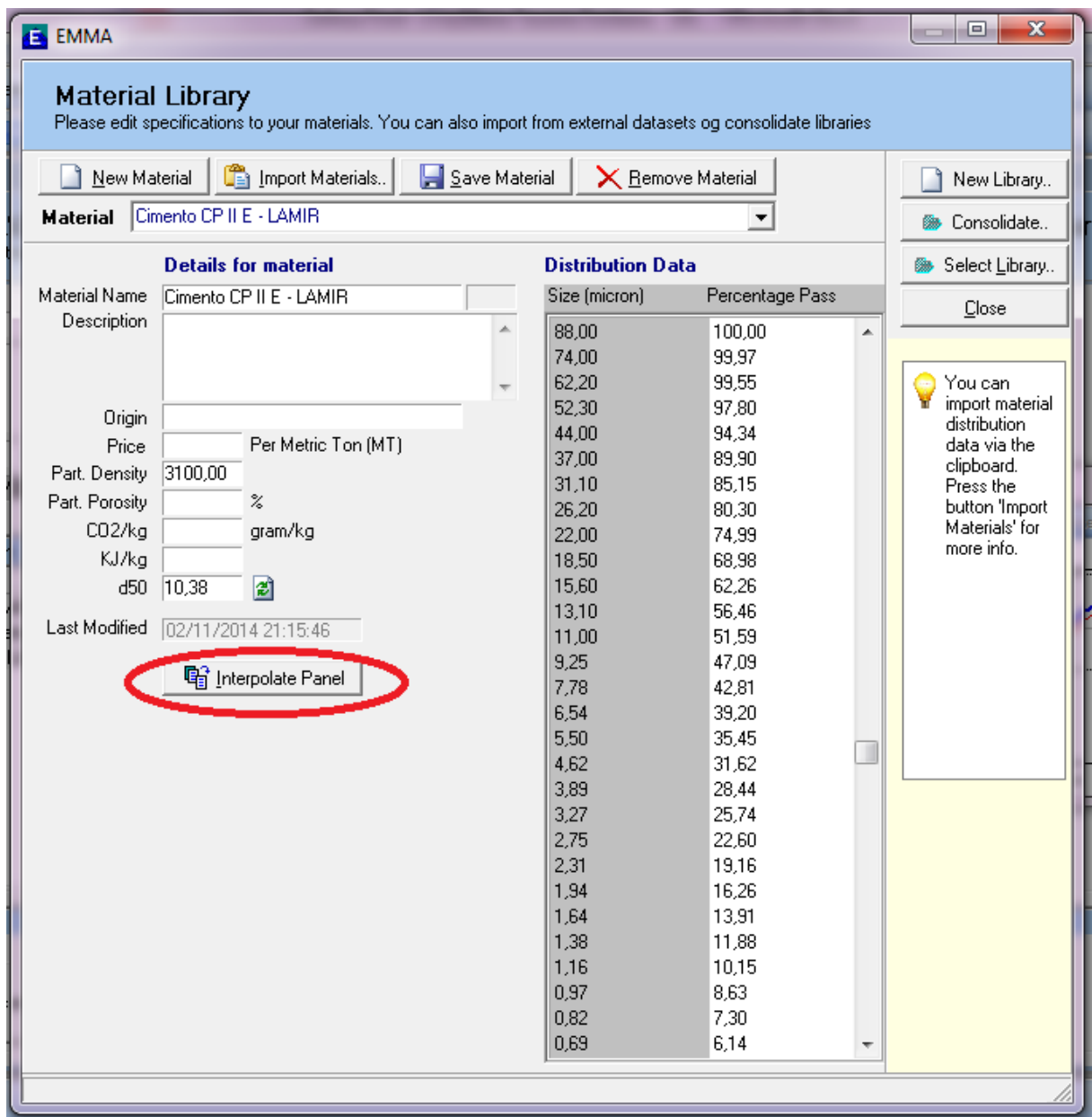
Na Figura 18 é exemplificado a inserção dos dados da massa específica e análise granulométrica do cimento no programa.

Ao inserir a distribuição granulométrica de cada material no programa e clicou-se em “Interpolate Panel”, onde ocorreu a interpolação automática do grãos e calculou-se o d50.

A distribuição granulométrica é composta por partículas de tamanho conhecido, normalmente definidas pelas aberturas de malhas das peneiras disponíveis, onde o programa EMMA calcula, por um processo de convergência gráfica a quantidade necessária de cada tamanho de grão de cada peneira para se produzir uma mistura com um determinado módulo de distribuição e a correspondente semelhança a curva final de distribuição, conforme o modelo de Alfred.

Após o cadastro dos materiais na biblioteca, deu-se início a composição da argamassa. Isto foi feito adicionando-se os materiais constituintes da argamassa numa espécie de “receita” (*Recipe Details* – como aparece no programa).

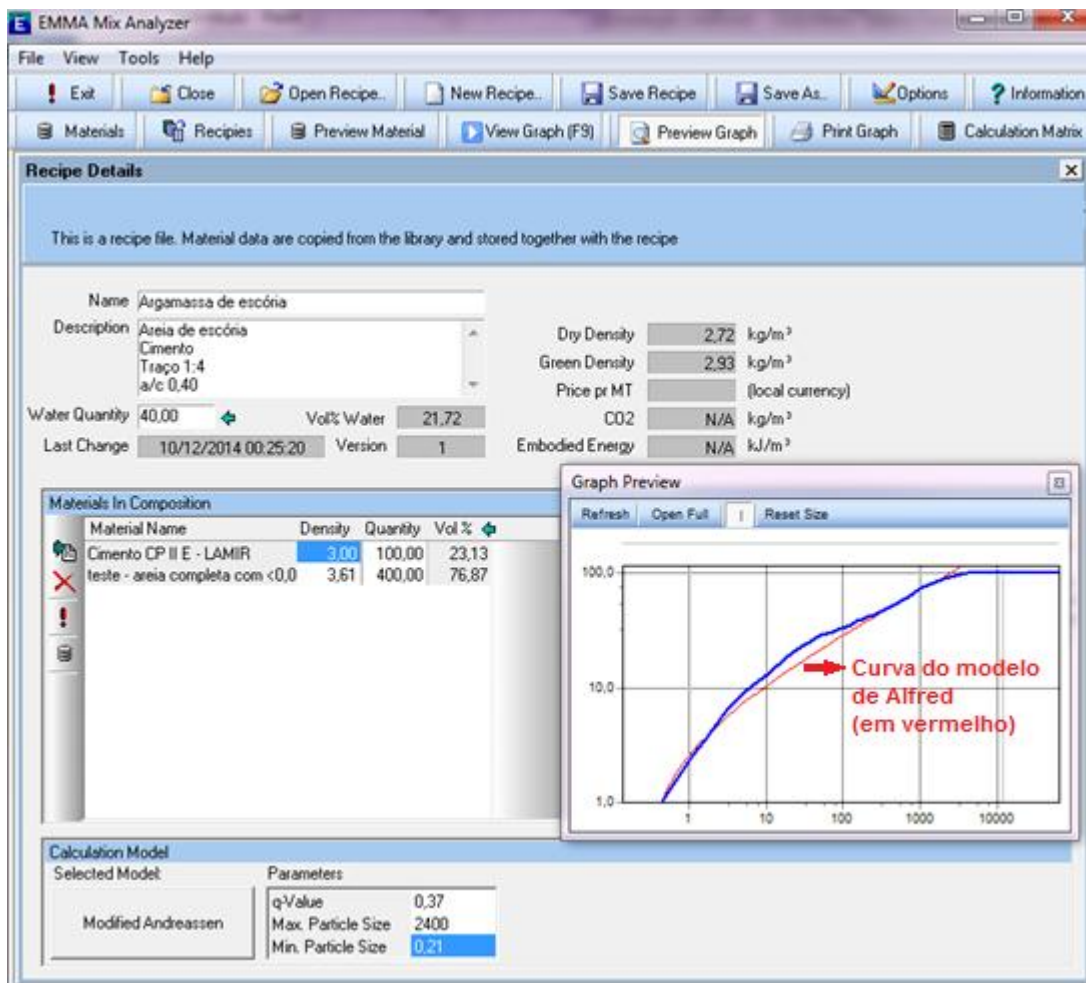
**Figura 18** – Página do programa EMMA para cadastrar os materiais utilizados na dosagem da argamassa.



Fonte: da autora.

Na Figura 19 pode-se visualizar a composição da “receita” pronta da argamassa, juntamente com a gráfico onde consta a distribuição granulométrica da argamassa de escória de aciaria comparada a curva do modelo de Alfred.

**Figura 19** – Formulação final da argamassa e representação gráfica do empacotamento baseado, neste caso, no modelo de Alfred



Fonte: da autora.

A proporção dos materiais, cimento e areia, foi ajustada por meio de tentativa e erro, sempre verificando que proporção de materiais se assemelharia mais a representação gráfica da curva do empacotamento máximo do modelo de Alfred, apresentada em vermelho no gráfico gerado pelo programa.

Os parâmetros utilizados foram o módulo de distribuição granulométrica (q-Value) de 0,37, tamanho máximo da partícula da argamassa igual a 2,4 mm e tamanho mínimo igual a 0,21, conforme demonstrado na Figura 20.

Estabeleceu-se o tamanho mínimo de 0,21  $\mu\text{m}$ , pois é o tamanho mínimo da partícula de cimento obtida através de granulometria a laser.

**Figura 20** – Parâmetros de cálculo usados no programa EMMA

Name: Argamassa de escória

Description: Areia de escória  
Cimento  
Traço 1:4  
a/c 0,40

Water Quantity: 40,00 Vol% Water: 21,72

Last Change: 03/11/2014 15:53:00 Version: 1

Dry Density: 2,72 kg/m<sup>3</sup>

Green Density: 2,93 kg/m<sup>3</sup>

Price pr MT: (local currency)

CO2: N/A kg/m<sup>3</sup>

Embodied Energy: N/A kJ/m<sup>3</sup>

Material Name	Density	Quantity	Vol %
Areia DTU completa - com fraç:	3,61	400	76,87
Cimento CP II E - LAMIR	3,00	100	23,13

Material Name: Areia DTU completa - com fração <0,0075

Description:

Origin:

CO2/kg: 0,00 KJ/kg: 0,00 Price pr MT:

Last Changed: 03/11/2014 15:20:44 Version:

Calculation Model

Selected Model: Modified Andreassen

Parameters

q-Value	0,37
Max. Particle Size	2400
Min. Particle Size	0,21

Fonte: da autora

Desta forma, utilizou-se o *software* EMMA para refinar a granulometria da areia de escória de aciaria FEA e também para obter a proporção dos materiais constituintes da argamassa.

Depois da definição das porcentagens retidas em cada fração granulométrica, de acordo com a convergência gráfica entre a curva de distribuição e a curva do modelo de Alfred, iniciou-se o peneiramento seguindo os preceitos da NBR NM 248/2003, onde se montou a sequência de peneiras da peneira 4,8 mm até a 0,075 mm. Todas as frações, inclusive o fundo, foram armazenadas individualmente em galões, antes de serem misturadas.

Foi necessário peneirar mais de 800 kg de escória de aciaria FEA para obter aproximadamente 3,5 kg de material passante na peneira #200, fração esta considerada a de maior dificuldade em se obter.

Para montar a areia AE, primeiramente, pesaram-se as frações separadamente e depois elas foram misturadas com o auxílio de uma lona plástica visando a sua homogeneização, conforme visualizado nas Figuras 21 e 22.

**Figura 21** – Pesagem das frações para montagem da areia



Fonte: da autora.

**Figura 22** – Frações após pesagem e homogeneização da areia de escória FEA



Fonte: da autora.

Após a homogeneização a areia de escória (AE) foi armazenada em um galão até a realização dos ensaios de caracterização e produção das argamassas.

Ao final do Estudo Preliminar A obtiveram-se os parâmetros necessários para a produção da argamassa de escória (ArgEA), sendo eles: a pasta

com menor número de vazios e a areia com o maior empacotamento. Visando a produção da argamassa de escória mais densa e compacta possível.

Com o auxílio do programa EMMA definiu-se a proporção de 1: 4 em massa, isto é, 1 de cimento para 4 de areia AE, respectivamente, para a ArgEA. Também no Estudo preliminar A: Parte 1 definiu-se a relação água/cimento de 0,40 com aditivo para a produção desta argamassa.

Na Tabela 5 estão apresentados os consumos de materiais necessários para a produção da campanha experimental da ArgEA.

**Tabela 5** - Consumo de materiais para produção da argamassa ArgEA

<b>Materiais</b>	<b>Consumo para produção de 1000 L</b>	<b>Consumo para produção de 8 L</b>
CP II-E-32 (kg)	494,44	3,96
Areia de escória de aciaria FEA (kg)	1977,78	15,82
Água (l)	197,78	1,58
Aditivo polifuncional (l)	4,94	0,039
Relação água/cimento	0,40	0,40

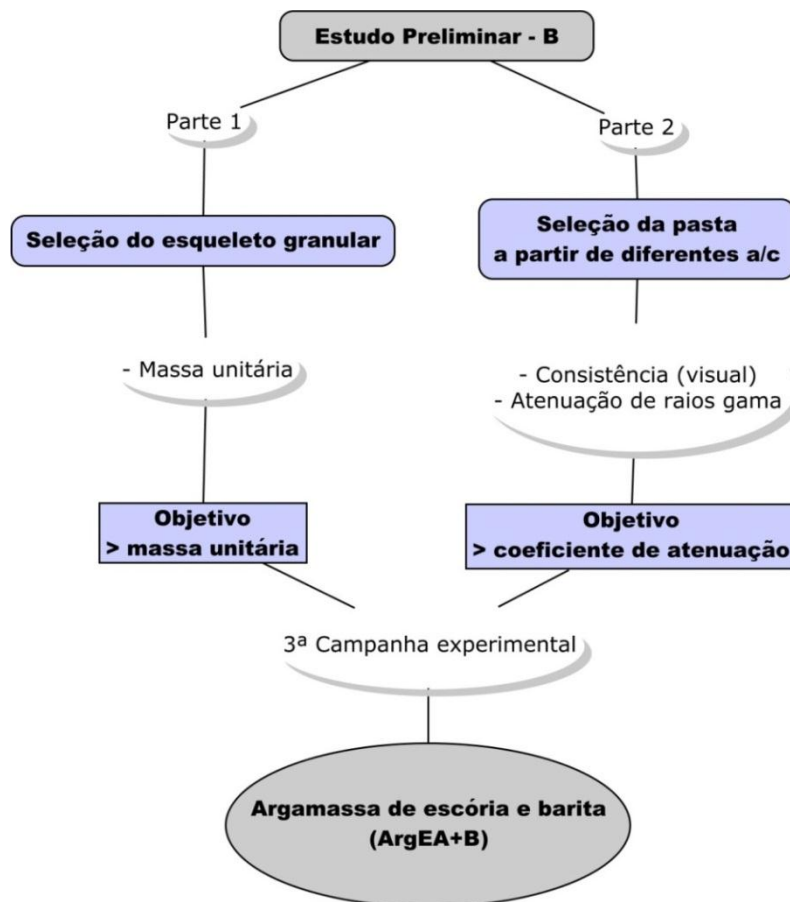
**Fonte:** da autora.

### 3.2.2.2 Estudo Preliminar B

No Estudo Preliminar B estabeleceu-se a dosagem da argamassa ArgEA+B (argamassa de escória e barita). Na Figura 23 é apresentado o fluxograma das etapas realizadas neste estudo.

Este estudo também foi dividido em duas partes, Parte 1 e Parte 2. Diferiu do Estudo Preliminar A no sentido que foi necessário acrescentar a barita na produção da ArgEA+B para se obter uma argamassa com uma massa específica ainda maior que a ArgEA, e assim, verificar se esse aumento na massa produziria uma diferença significativa na atenuação de radiação.

**Figura 23** - Fluxograma das etapas realizadas no Estudo preliminar – B



Fonte: da autora.

### 3.2.2.2.1 Parte 1 - Seleção do esqueleto granular da areia de escória de aciaria FEA e pó de barita

Para isso, na Parte 1, selecionou-se a composição granulométrica do esqueleto granular da combinação de escória de aciaria FEA e barita (AE+B).

Para definir a composição AE+B, diferentemente do que foi feito no Estudo Preliminar A – Parte 2, foram testadas 6 diferentes porcentagens de pó de barita (B), em relação à massa de cimento, em conjunto com a areia AE (previamente definida no Estudo preliminar A: Parte 2) e mensuradas as massas unitárias destas combinações.

Assim, no Estudo Preliminar B não se utilizou do software EMMA para estimar o empacotamento da areia de escória (AE) com o pó de barita. No programa EMMA, a estimativa dada para a massa específica da argamassa não era confiável e a diferença não era significativa entre a curva granulométrica da areia

experimental e a curva de Alfred, de forma que a constante de densidade de empacotamento foi feita pela massa unitária.

No Quadro 11 são apresentadas as combinações de pó de barita (B) e areia de escória de aciaria FEA (AE) que deram origem ao estudo da composição do esqueleto granular da areia da argamassa de escória e barita (ArgEA+B).

**Quadro 11 – Combinações de areia de escória de aciaria FEA com pó de barita**

Combinação	Amostras
Nº1	AE + 30% B
Nº2	AE + 40% B
Nº3	AE + 50% B
Nº4	AE + 60% B
Nº5	AE + 70% B
Nº6	AE + 80% B

\*Porcentagem da barita em relação à massa de cimento

**Fonte:** da autora.

As combinações com 90% e 100% de pó de barita em relação a massa de cimento não foram testadas, pois como o pó de barita é muito fino poderia requerer um elevado consumo de água e também poderia haver problemas de retração com a argamassa produzida.

#### 3.2.2.2.2 Parte 2 - Seleção da pasta com diferentes relações a/c

A Parte 2 contemplou a seleção da relação água/cimento a ser utilizada na dosagem da argamassa ArgEA+B. Como nesta argamassa, devido a incorporação do pó de barita, haveria um maior teor de finos optou-se por testar duas relações a/c.

Assim, escolheram-se as relações a/c de 0,40 e 0,45 baseado nas porcentagens de poros obtidas através do Estudo Preliminar – A: Parte 1.

No Quadro 12 exibem-se as relações a/c e as composições das areias utilizadas para fazer as argamassas encaminhadas para o ensaio de atenuação de raios gama.

**Quadro 12 – Composição das areias utilizadas para fazer as argamassas do Estudo Preliminar – B: Parte 2**

Relação a/c	Combinação	Composição
0,40	Nº2	AE + 40% B
	Nº4	AE + 60% B
	Nº6	AE + 80% B
0,45	Nº2	AE + 40% B
	Nº4	AE + 60% B
	Nº6	AE + 80% B

\*Porcentagem da barita em relação à massa de cimento

Fonte: da autora.

Depois de produzidas as argamassas, conforme o Quadro 12, foram realizados os ensaios de atenuação de radiação com estas seis argamassas.

### 3.2.2.3 3ª Campanha Experimental

Como critério para seleção da ArgEA+B, 3ª campanha experimental, adotou-se o maior coeficiente de atenuação e a argamassa que apresentasse, visualmente, a melhor consistência, ou seja com plasticidade suficiente para ser utilizada como argamassa de revestimento.

Para a produção da ArgEA+B utilizou-se a relação a/c de 0,45 e a proporção de 80% de barita, assim o traço definido foi de 1:0,8:4 (cimento, barita e AE). Na Tabela 6 estão expostos os consumos de materiais necessários para a produção da campanha experimental da argamassa ArgEA+B.

**Tabela 6 - Consumo de materiais para produção da ArgEA+B**

Materiais	Consumo para produção de 1000 L	Consumo para produção de 8 L
CP II-E-32 (kg)	494,44	3,96
Areia de escória de aciaria FEA (kg)	1977,78	15,82
Pó de barita (kg)	395,55	3,17
Água (l)	222,50	1,78
Aditivo polifuncional (l)	4,94	0,039
Relação água/cimento	0,45	0,45

Fonte: da autora.

### 3.2.2.4 Consumos de materiais da argamassa de referência (ArgRef)

Para fazer a produção da ArgRef por ser uma argamassa comercial que possuía uma dosagem pré-estabelecida pelo fabricante, bastou adicionar água à mistura.

Na dosagem da argamassa de referência (ArgRef) seguiu-se a orientação do fabricante, onde a cada 25 kg de material deveriam ser adicionados 5 litros de água (GRUPO GRX, 2014a).

Na Tabela 7 apresenta-se o consumo de materiais para a ArgRef.

**Tabela 7** - Consumo de materiais para a ArgRef (argamassa de referência)

Material	Consumo para produção de 1000 L	Consumo para produção de 8 L
Argamassa baritada (kg)	2200	17,6
Água (l)	440	3,52

Fonte: da autora.

### 3.2.2.5 Planejamento dos ensaios para as argamassas no estado fresco e endurecido

O Quadro 13 apresenta os ensaios de caracterização para as argamassas no estado fresco e as respectivas normas.

**Quadro 13** - Ensaios e respectivas normas para argamassa no estado fresco

Ensaio	Norma
Massa específica	NBR 9833/2009
Índice de consistência (Flow Table)	NBR 13276/2005

Fonte: da autora.

No Quadro 14 é apresentado o planejamento dos ensaios, onde se especifica a dimensão dos corpos de prova, o número de amostras, a idade dos respectivos ensaios para as argamassas e também as normas utilizadas para caracterizar as argamassas no estado endurecido.

**Quadro 14** - Planejamento e normas utilizadas nos ensaios para as argamassas

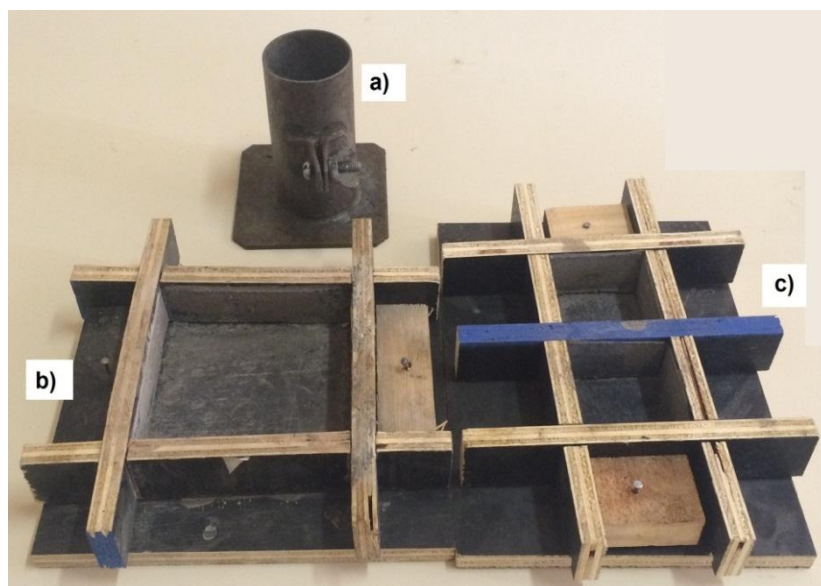
Ensaio	Dimensão (mm)	Amostras CP	Amostras por idade		Normas para ensaio no estado endurecido
			7 dias	28 dias	
Resistência à compressão	50 x 100	10	5	5	NBR 5739/2007
Resistência à tração	50 x 100	5	0	5	NBR 7222/2011
Módulo de elasticidade	50 x 100	5	0	5	NBR NM 58/1996, NBR 6118/2007 e CEB/FIP 2010
Absorção de água e índice de vazios	50 x 100	5	0	5	NBR 9778/2009
Absorção de água por capilaridade	50 x 100	5	0	5	NBR 9779/2012
Atenuação de radiação gama	100 x 100 x 30	5	0	5	-

Fonte: da autora.

Ao moldar as amostras para os ensaios de atenuação de raios gama não pode ser passado nenhum tipo de desmoldante nas formas para não ocorrer o tamponamento dos poros e haver interferência nos resultados. Destaca-se que as dimensões dos moldes para as amostras de atenuação de radiação foram condicionadas ao equipamento.

A Figura 24 apresenta as formas utilizadas para realização dos ensaios.

**Figura 24** – Formas utilizadas nos ensaios: a) Molde cilíndrico b) Forma 100 x 100 x 30 mm c) Forma 50 x 50 x 30 mm



Fonte: da autora.

O adensamento dos corpos de prova cilíndricos foi feito conforme a NBR 7215/1997, isto é, foram preenchidos com 4 camadas praticamente iguais adensadas manualmente com 30 golpes cada.

Para o adensamento das amostras para o ensaio de atenuação de radiação utilizou-se a mesa vibratória, Figura 25, onde as amostras, tampadas, foram adensadas uma por vez e em uma única camada pelo tempo de 1 minuto.

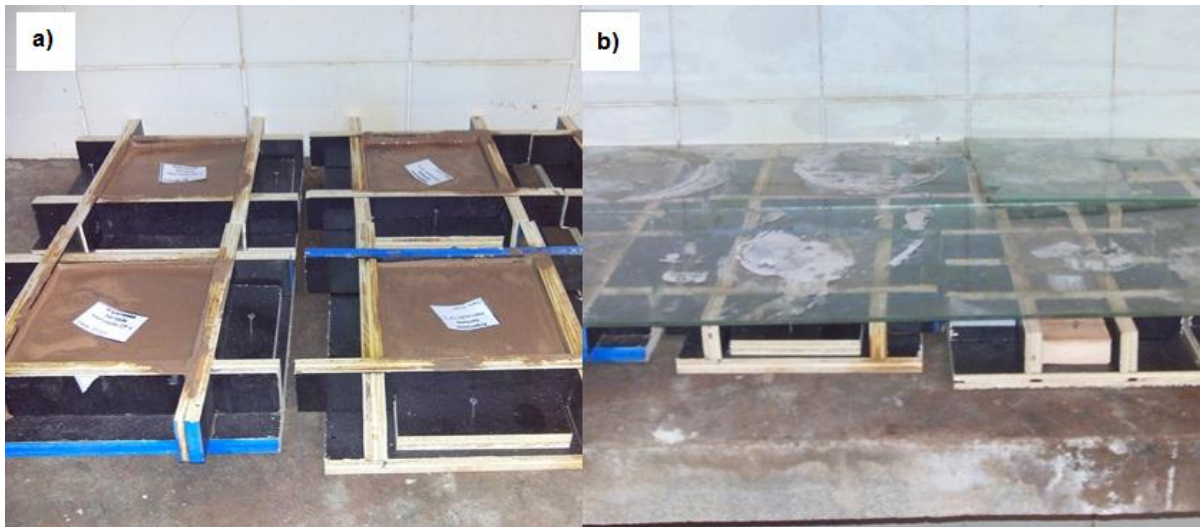
**Figura 25** – Adensamento dos corpos de prova na mesa vibratória



**Fonte:** da autora.

Após o adensamento, as amostras e os corpos de prova foram levados para a câmara úmida, onde ficaram tampados com placas de vidro por 24 horas até serem desmoldados, conforme Figura 26. E depois foram submetidos à cura submersa até a data dos ensaios.

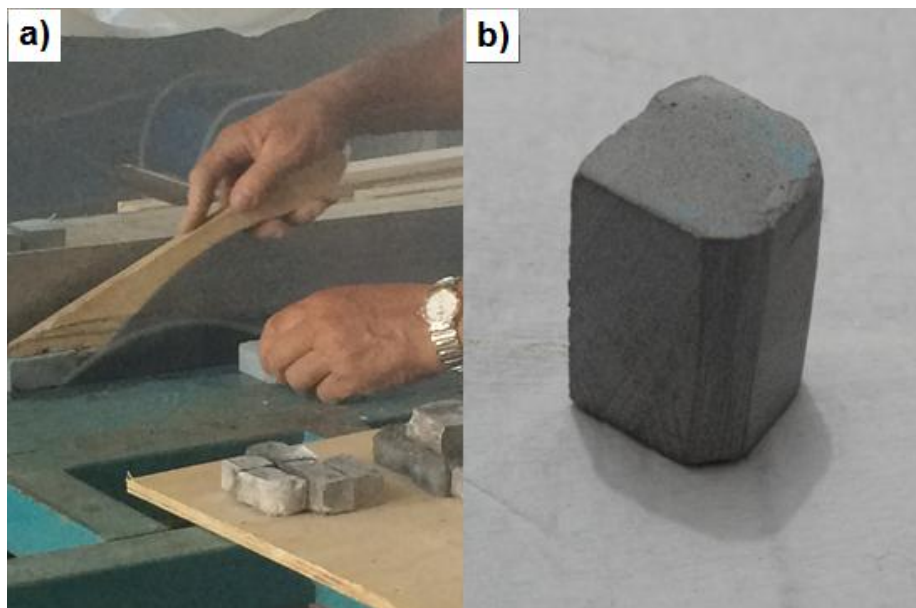
**Figura 26** – a) Amostras após adensamento b) Amostras cobertas com placas de vidro



Fonte: da autora.

Assim como no trabalho de Maurício *et al.* (2012), as amostras usadas no ensaio de porosidade da pasta tiveram que ser cortadas com o auxílio de uma serra circular no tamanho de 10 x 10 x 30 mm na idade de 7 dias, conforme Figura 27.

**Figura 27** – a) Corte com serra circular das amostras após 7 dias. b) Amostra pronta para o ensaio de porosidade, com dimensões de 10 x 10 x 30 mm



Fonte: da autora.

Este tamanho de amostra foi limitado pelo aparelho de microtomografia de raios-X que além de somente comportar amostra pequena, também quanto maior a espessura do corpo de prova maior o tempo necessário para ocorrer à leitura dos dados.

Com a idade de 27 dias as amostras para o ensaio de atenuação foram retiradas da cura submersa, secas a temperatura de  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  por 24 horas e embaladas com plástico PVC até a realização do ensaio de atenuação de radiação, de acordo com a Figura 28.

**Figura 28** – Amostras para o ensaio de atenuação de radiação seladas com plástico PVC



Fonte: da autora.

### 3.2.2.6 Ensaio no estado endurecido

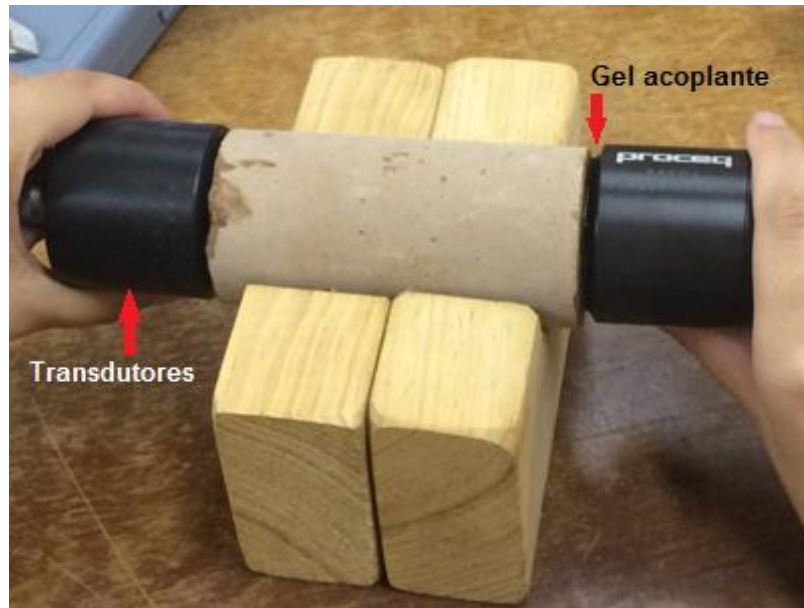
Nos itens a seguir são apresentadas os ensaios realizados com as argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B no estado endurecido.

#### 3.2.2.6.1 *Módulo de elasticidade*

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado através da velocidade de propagação de onda ultrassônica (NBR 8802/2013) e estimado utilizando as equações estabelecidas na NBR 6118/2007 e pelo CEB/FIP 2010 (Comité Euro/Internacional du Béton).

A velocidade de propagação de ondas foi determinada por transmissão direta, em m/s, onde se posicionou os transdutores nas faces opostas dos corpos de prova. Foi utilizado um gel como material acoplante para assim minimizar os espaços entre a amostra e os transdutores, conforme visualizado na Figura 29.

**Figura 29** – Ensaio de ultrassom



Fonte: da autora.

Calculou-se o módulo de elasticidade através da Equação 5:

$$E_c = \frac{V^2 \times \rho \times (1 + \nu) \times (1 - 2 \times \nu)}{(1 - \nu)} \times 10^{-3}$$

Equação 5

Onde:

$E_c$  = módulo de elasticidade da argamassa em GPa;

$V$  = velocidade ultrassônica em m/s;

$\rho$  = Massa específica da argamassa em kg/m<sup>3</sup>;

$\nu$  = Coeficiente de Poisson estimado em 0,20.

Com base nas Equação 6 e Equação 7, NBR 6118/2007 e CEB/FIP 2010 respectivamente, foram feitas estimativas teóricas do módulo de elasticidade:

$$E_c = 5600 \times \sqrt{f_{ck}}$$

Equação 6

Onde:

$E_c$  = módulo de elasticidade da argamassa em GPa;

$f_{ck} = f_{c28} - 1,65 \times sd$  (em MPa).

$$E_c = 2,15 \times 10^4 \times \sqrt[3]{\frac{f_{c28}}{10}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$E_c$  = módulo de elasticidade da argamassa em GPa;

$f_{c28}$  = resistência média aos 28 dias em MPa;

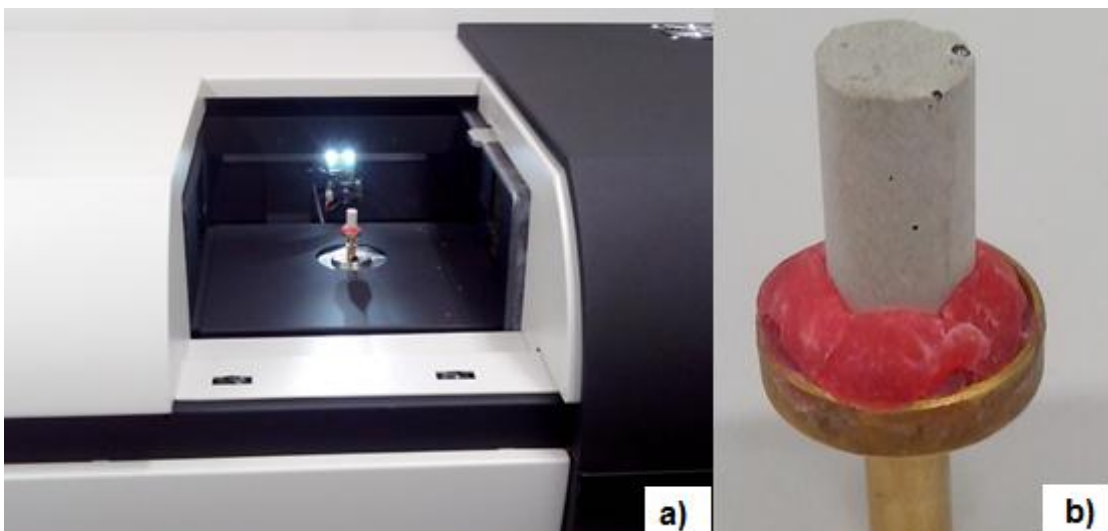
$sd$  = Desvio padrão (considerado neste trabalho como 2 MPa).

Considerou-se o desvio mínimo estabelecido pela norma NBR 12655/2015 – Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, por se tratar de uma argamassa produzida em laboratório com controle de preparo.

### 3.2.2.6.2 Porosidade

A estimativa da porosidade das pastas foi realizada através de microtomografia computadorizada tridimensional por transmissão de raios-X (micro-CT), conforme a Figura 30.

**Figura 30** – a) Localização da amostra dentro do micro-CT b) Amostra fixada ao porta-amostra com cera ortodôntica



Fonte: da autora.

Neste ensaio estima-se a quantidade de poros presentes nos materiais sem destruir a amostra.

### 3.2.2.6.3 Atenuação de radiação gama

Através deste ensaio que se estimou o coeficiente de atenuação de radiação das argamassas apresentadas neste trabalho.

Para a determinação do coeficiente atenuação de radiação gama foi necessário ter a espessura do material absorvedor, a intensidade de radiação que incide ( $I_0$ ) e a intensidade de radiação que emerge do material ( $I$ ).

Desta forma, primeiramente mensuraram-se as medidas das espessuras das amostras com um paquímetro, foram feitas 2 medidas por lateral com o auxílio de um paquímetro, o que totalizou 8 medidas por corpo de prova, Figura 31. Calculou-se então a espessura média de cada amostra.

**Figura 31** - Uso de paquímetro para tomada das medidas das espessuras dos corpos de prova



Fonte: da autora.

Uma mesa micrométrica foi usada para determinar o coeficiente de atenuação de raios gama das argamassas. A mesa contém uma fonte de Césio-137 com energia de 661 keV, um porta-amostra, um detector semicondutor e um computador equipado com um software da Ortec que recebe os dados emitidos, conforme Figura 32.

**Figura 32** - Mesa micrométrica usada para obter o coeficiente de atenuação de radiação gama das argamassas



**Fonte:** adaptado de González-Ortega *et al.* (2014)

Como o porta-amostra desloca-se nos eixos x e y garantiu-se a varredura completa dos dados em todas as partes da amostra. Após a colocação do corpo de prova no equipamento, entre a fonte colimada de Césio-137 e o detector, configurou-se o software para fazer a leitura dos dados emitidos. Programou-se por quanto tempo seriam feitas as leituras da amostra, isto é, o intervalo de tempo em que o raio gama incidiu sobre um determinado ponto e de quantos em quantos micrometros seriam feitas as leituras. Os ensaios com as argamassas levaram, em média, meia hora por amostra.

Antes de se realizar os ensaios estimou-se a intensidade de radiação que incidiu no material ( $I_0$ ), realizando os mesmos procedimentos anteriores, mas com uma duração menor e sem a amostra.

Após o término dos ensaios foi feita a análise dos dados e a estimativa do potencial de atenuação gama das argamassas através da lei de Beer-Lambert.

### 3.2.2.7 Análise estatística dos resultados

Os resultados foram analisados estatisticamente com o auxílio do software Action, suplemento em R para o MicroSoft Excel. Utilizou-se a técnica de análise de variância – ANOVA e o teste Tukey para comparar as médias dos

tratamentos. Os testes foram feitos considerando 5% de significância, onde para p-valor menor que 5% existem diferenças significativas entre as amostras. Por fim, utilizou-se também o teste de HSU que comparar todos os tratamentos e definir o melhor (EQUIPE ESTATCAMP, 2014).

As análises estatísticas podem ser conferidas no Anexo A, página 119.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo são apresentados os resultados das caracterizações das areias AE e AE+B, dos Estudos Preliminares A e B, dos ensaios no estado fresco e endurecido para as ArgRef, ArgEA e ArgEA+B, conforme fluxograma apresentado na Figura 11.

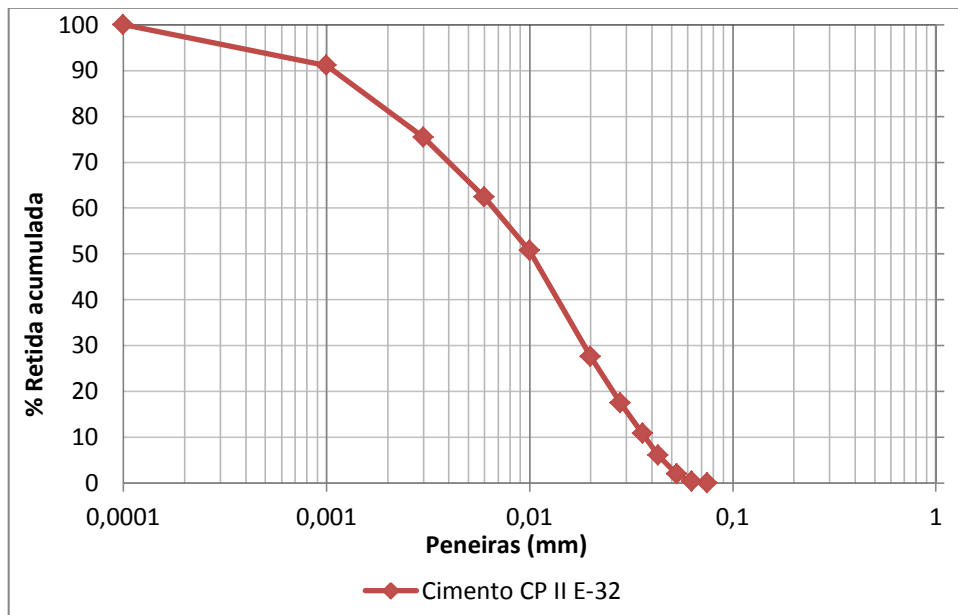
Para a produção das argamassas ArgEA e ArgEA+B foi necessário formular areias que tivessem a maior compactidade e massa unitária. Para atingir esse propósito utilizou-se agregado pesado escória de aciaria (FEA), que é um coproduto da produção do aço no forno elétrico a arco.

Como este coproduto pode apresentar certa variabilidade em sua composição foi necessário primeiro caracterizar a areia de escória FEA (AE) e a areia de escória e barita (AE+B), determinar suas características físicas, para viabilizar a utilização deste agregado na produção das argamassas.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

#### 4.1.1 Cimento Portland

No Gráfico 5 expõe-se a curva granulométrica do cimento obtida através do ensaio de granulometria a laser realizado pelo laboratório LAMIR – Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da Universidade Federal do Paraná, localizado na cidade de Curitiba/PR.

**Gráfico 5** – Curva granulométrica do CP II-E-32

**Fonte:** da autora.

#### 4.1.2 Pó de Barita

Na Tabela 8 apresenta-se a composição granulométrica do pó de barita, obtida através do ensaio com granulômetro a laser.

**Tabela 8** - Composição granulométrica do pó de barita.

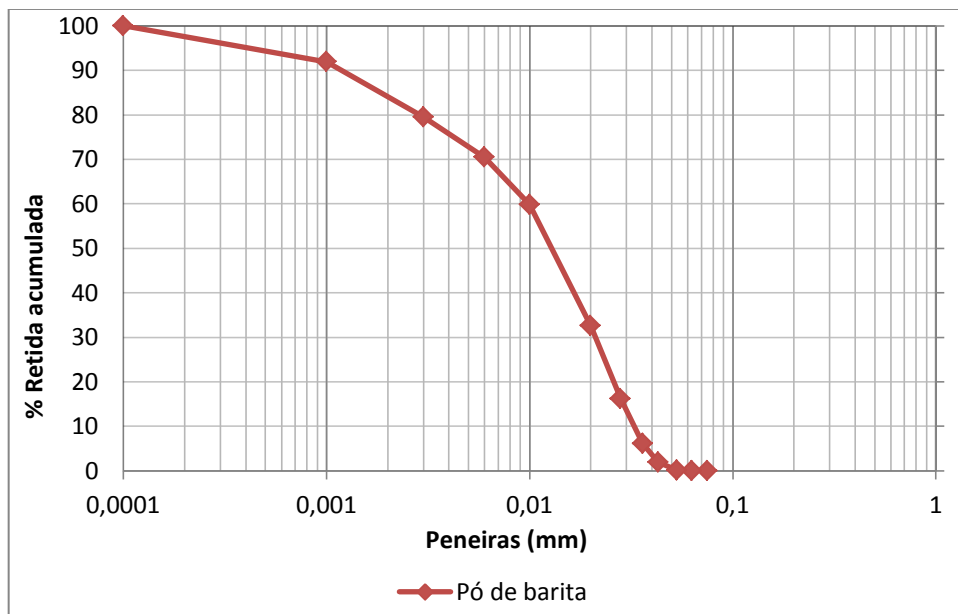
N° da peneira	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)
200	0,075	0,00	0,00	-
250	0,063	0,00	0,00	-
270	0,053	0,12	0,12	0,12
325	0,043	1,78	1,78	1,90
400	0,036	4,25	4,25	6,15
500	0,028	10,06	10,06	16,21
635	0,020	16,36	16,36	32,57
-	0,010	27,27	27,27	59,84
-	0,006	10,62	10,62	70,46
-	0,003	9,08	9,08	79,54
-	0,001	12,38	12,38	91,92
-	0,000	8,08	8,08	100,00
<b>Total</b>	-	100	100	100

**Fonte:** da autora.

Através da Tabela 8 nota-se que este material possui dimensão máxima de 0,043 mm e, considerando que 100% de sua granulometria passa na peneira # 200 é classificado como pó.

Com base nos dados da Tabela 8 foi traçada a curva granulométrica, conforme Gráfico 6.

**Gráfico 6** - Curva granulométrica do pó de barita



Fonte: da autora.

Na Tabela 9 são apresentadas as massas específica e unitária do agregado barítico.

**Tabela 9** – Massas específica e unitária do agregado barítico

Agregado	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
Pó de barita	4,18	1,81

Fonte: da autora.

Verifica-se que o pó de barita apresenta densidade semelhante a encontrada por autores como Mostofinejad *et al.* (2012), Frimaio (2006) e Akkurt *et al.* (2012).

#### 4.1.3 Agregado de Escória de Aciaria de Forno Elétrico

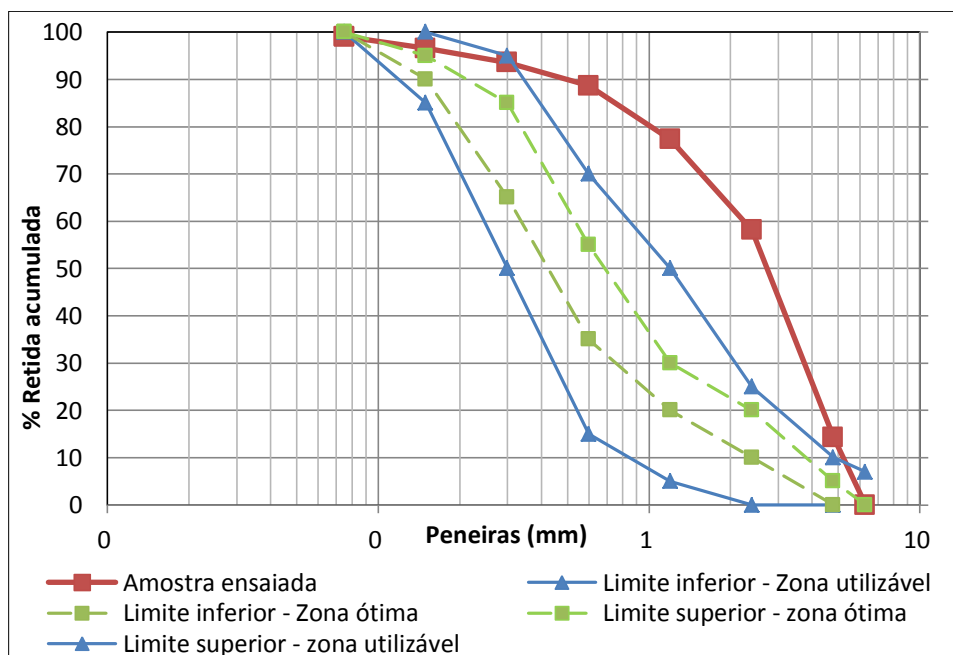
A composição granulométrica do agregado miúdo siderúrgico encontra-se na Tabela 10 e esta representada no Gráfico 7, juntamente com as curvas limites estabelecidas pela NBR 7211/2009.

**Tabela 10** - Composição granulométrica do agregado miúdo siderúrgico

N° da peneira	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Porcentagem Retida (%)	Porc. Retida Acumulada (%)
3/8	9,5	5	0,49	0,49
4	4,8	140	13,80	14,29
8	2,4	445	43,84	58,13
16	1,2	195	19,21	77,34
30	0,6	115	11,33	88,67
50	0,3	50	4,93	93,60
100	0,15	30	2,96	96,56
200	0,075	25	2,45	99,01
Fundo	0	10	0,99	100
<b>Total</b>	-	1015	100	100

Fonte: da autora.

**Gráfico 7** - Curva granulométrica do agregado miúdo siderúrgico



Fonte: da autora.

Da observação do Gráfico 7, constata-se que o agregado siderúrgico está fora dos limites da norma. Também se verifica que apesar de visualmente ser uma areia grossa este agregado, pela sua dimensão máxima de 9,5 mm e módulo de finura de 4,29 caracteriza-se como uma brita zero.

Na Tabela 11 estão os parâmetros de caracterização do agregado miúdo siderúrgico.

**Tabela 11** - Parâmetro de caracterização do agregado siderúrgico

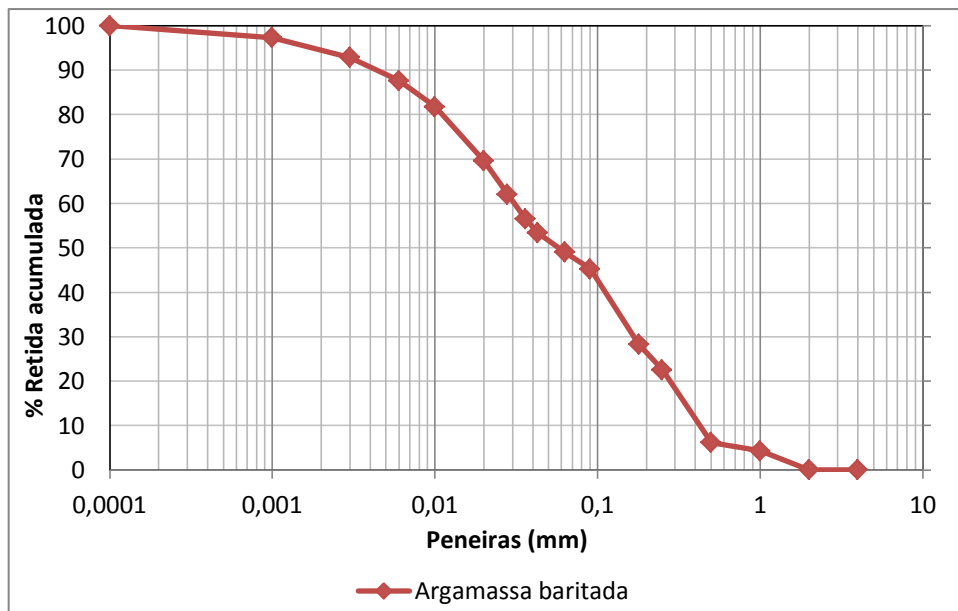
Agregado	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Teor material pulverulento (%)	Absorção de água (%)	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura
Agregado siderúrgico	3,60	2,15	2,78	2,17	9,5	4,29

Fonte: Fontana *et al.* (2013)

#### 4.1.4 Argamassa Baritada

O Gráfico 8 apresenta a curva granulométrica da argamassa baritada obtida em ensaio com granulômetro a laser realizado no laboratório LAMIR.

**Gráfico 8** – Curva granulométrica da argamassa baritada comercial usada como argamassa de referência



Fonte: da autora.

Através da análise granulométrica pode-se verificar que a argamassa baritada possui uma curva praticamente contínua, apresentando 50% de suas frações menores que 0,063 mm.

#### 4.1.5 Areia de Escória de Aciaria FEA

Os valores encontrados na análise granulométrica da areia de escória de aciaria FEA (AE) usada na produção das argamassas encontram-se na Tabela 12.

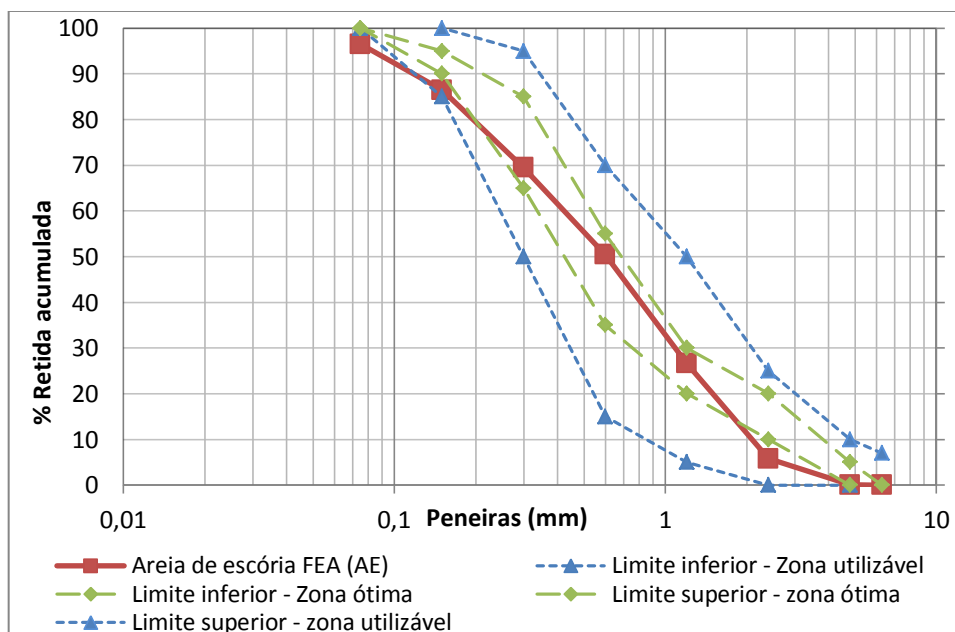
**Tabela 12** - Composição granulométrica da areia de escória de aciaria FEA (AE)

N° da peneira	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)
4	4,8	0,36	0,04	0,04
8	2,4	57,24	5,74	5,77
16	1,2	208,25	20,87	26,65
30	0,6	237,21	23,78	50,42
50	0,3	189,87	19,03	69,45
100	0,15	169,79	17,02	86,47
200	0,075	100,15	10,04	96,51
Fundo	0	34,81	3,49	100
<b>Total</b>	-	997,68	100	100

Fonte: da autora.

Com base nos dados da Tabela 12 e nos limites da NBR 7211/2009 foram traçadas as curvas granulométricas, conforme Gráfico 9:

**Gráfico 9** - Curva granulométrica da areia de escória de aciaria FEA e limites da NBR 7211/2009



Fonte: da autora.

Da observação do Gráfico 9, verifica-se que a AE está praticamente dentro da zona ótima da norma e possui dimensão máxima de 4,8 mm e módulo de finura de 2,39. Na Tabela 13 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da AE.

**Tabela 13** - Resultado do ensaio de caracterização da areia de escória de aciaria FEA (AE)

Agregado	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Teor material pulverulento (%)	Absorção de água (%)
AE	3,61	2,00	12,10	3,6

Fonte: da autora.

A massa específica para a areia AE obtida neste trabalho está dentro da faixa de valores encontrados por Fontana *et al.* (2013), Maslehuddin *et al.* (2003) e Manso *et al.* (2004), conforme Quadro 6, página 43.

Devido ao elevado teor de finos e pó constata-se que está areia possui um teor de material pulverulento superior aos encontrados pelos autores mencionados.

#### 4.1.6 Combinação de Escória de Aciaria FEA e Pó de Barita

A composição granulométrica combinação de escória de aciaria FEA e pó de barita (AE+B) é apresentada na Tabela 14.

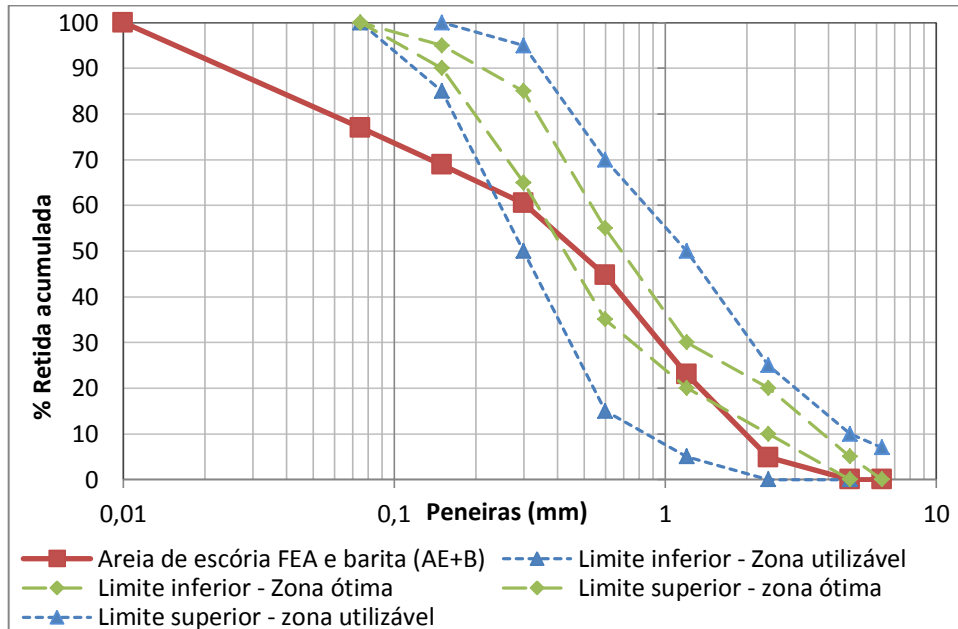
**Tabela 14** - Composição granulométrica da areia com combinação de escória de aciaria FEA e pó de barita (AE+B)

N° da peneira	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)
4	4,8	0,00	0,00	0,00
8	2,4	48,08	4,82	4,82
16	1,2	181,24	18,16	22,97
30	0,6	216,94	21,73	44,71
50	0,3	157,28	15,76	60,47
100	0,15	83,86	8,40	68,87
200	0,075	81,16	8,13	77,00
Fundo	0	229,58	23,00	100
<b>Total</b>	-	998,14	100	100

Fonte: da autora.

Baseado nos dados da Tabela 14 e nos limites da NBR 7211/2009 foram plotadas as curvas granulométricas, conforme Gráfico 10:

**Gráfico 10** - Curva granulométrica da areia com combinação de escória de aciaria FEA e barita e os limites da NBR 7211/2009



Fonte: da autora.

Ao analisar o Gráfico 10, constata-se que até a peneira de abertura igual a 0,3 mm a AE+B está dentro dos limites da zona utilizável da norma. A partir das peneiras de abertura igual a 0,15 e 0,075 mm, os valores fora da curva se devem a incorporação do pó de barita à areia, como este pó possui 100% de seus grãos menores que a peneira #200 aumentou consideravelmente o teor de material pulverulento da AE+B.

Esta combinação apresenta dimensão máxima de 2,4 mm e módulo de finura de 2,01.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados da caracterização da AE+B.

**Tabela 15** - Resultado do ensaio de caracterização da combinação de escória de aciaria FEA e pó de barita (AE+B)

Agregado	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Teor material pulverulento (%)	Absorção de água (%)
AE+B	3,68	2,11	25,45	6,80

Fonte: da autora.

O valor encontrado para o teor de pulverulento reafirma o encontrado no ensaio de análise granulométrica, pois como esta é uma areia com uma alta porcentagem de pó.

Ao comparar as duas areias verifica-se que a AE+B possui uma massa específica 1,90% maior que a AE. Isto foi devido à incorporação de barita na composição da areia, que por possuir uma massa específica igual a  $4,18 \text{ g/cm}^3$  ao ser composta com a areia de escória de aciaria FEA acabou aumentando a sua massa.

A absorção de água da areia AE+B é 47,05% maior que a absorção da AE, isto se deve a maior área específica da AE+B que requer um maior consumo de água.

## 4.2 ESTUDOS PRELIMINARES

Antes de serem feitas as campanhas experimentais das argamassas ArgEA e ArgEA+B foram necessários os Estudos Preliminares (A e B) para determinar a relação água/cimento e a distribuição granulométrica que contribuiriam para se ter as argamassas com maior empacotamento e menor porcentagem de vazios. Assim, a seguir, são apresentados os resultados destes estudos.

### 4.2.1 Estudo Preliminar – A

#### 4.2.1.1 Parte 1 – Seleção da pasta

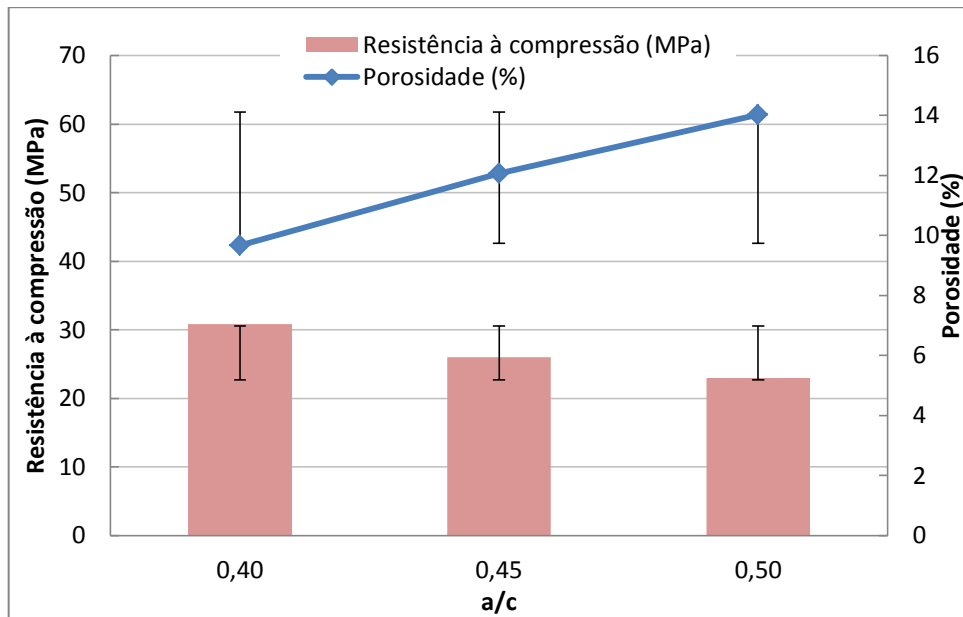
Na Tabela 16 e no Gráfico 11 são apresentadas as relações água/cimento e as respectivas porcentagens de poros, sem utilização de aditivo.

**Tabela 16** – Relações água/cimento e respectivas porcentagens de poros, sem utilização de aditivo

Amostras	Relação água/cimento	% Poros	Desvio padrão
	0,40	9,67	8,88
	0,45	12,07	1,46
	0,50	14,03	4,27

Fonte: da autora.

**Gráfico 11** – Porosidade das pastas sem aditivo e respectivas resistências à compressão



Fonte: da autora.

No Gráfico 11, verifica-se que a resistência à compressão aumentou conforme a diminuição da porosidade, sendo este tipo de resultado já observado anteriormente por autores como Lange *et al.* (1997), Jeenu *et al.* (2012) e Chen *et al.* (2013).

Na Tabela 17 são exibidas as relações água/cimento e as respectivas porcentagens de poros, com utilização de aditivo.

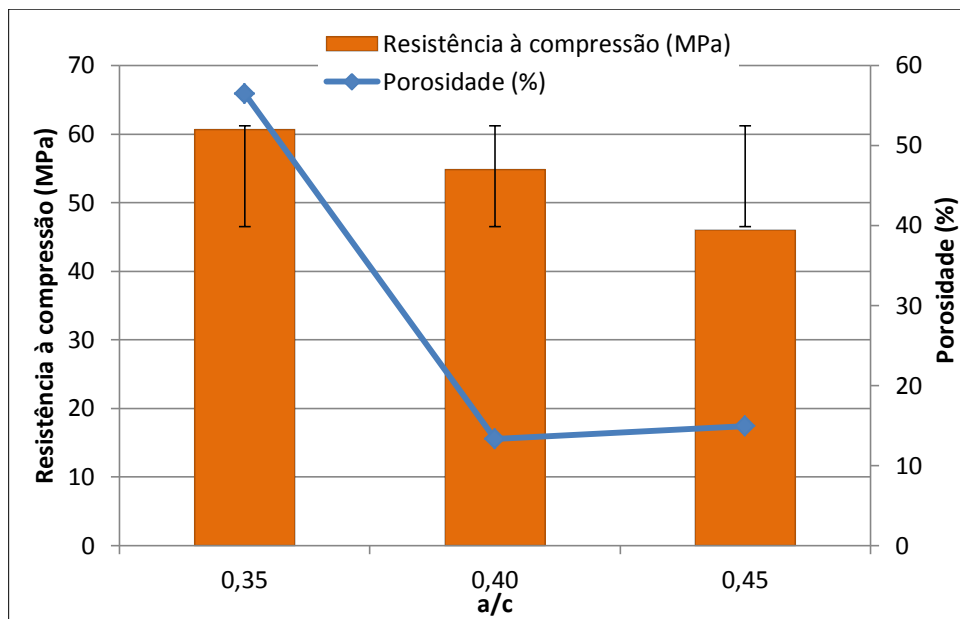
**Tabela 17** - Relações água/cimento e respectivas porcentagens de poros, com utilização de aditivo

Amostras	Relação água/cimento	% Poros	Desvio padrão
	0,35	56,45	4,63
	0,40	13,33	5,66
	0,45	14,93	3,56

Fonte: da autora.

E no Gráfico 12 apresentam-se os resultados de resistências à compressão correlacionadas com as respectivas porosidades das pastas.

**Gráfico 12** - Porosidade das pastas com aditivo e respectivas resistências à compressão



Fonte: da autora.

Observa-se que a resistência à compressão aumentou conforme a diminuição do teor de água adicionado à pasta e que as pastas com as menores relações a/c possuem as maiores porosidades.

Com base nos resultados do ensaio de porosidade das amostras de pasta - com e sem aditivo, primeiramente, escolheu-se a relação água/cimento 0,40 sem aditivo para realização da dosagem da ArgEA, mas durante o processo de mistura dos materiais verificou-se que a consistência estava muito seca o que inviabilizava sua utilização como argamassa de revestimento.

Assim, optou-se por usar a relação água/cimento 0,40 com aditivo para a dosagem da ArgEA, que apesar de ter 27,46% a mais de poros que a pasta com relação a/c 0,40 sem aditivo apresentou uma resistência 43,81% superior, com baixa porosidade e melhor trabalhabilidade.

#### 4.2.1.2 Parte 2 – Seleção do esqueleto granular da areia de escória de aciaria FEA

Após a inserção de dados no programa EMMA estabeleceu-se a composição granulométrica da areia AE utilizada neste trabalho, conforme a Tabela 18.

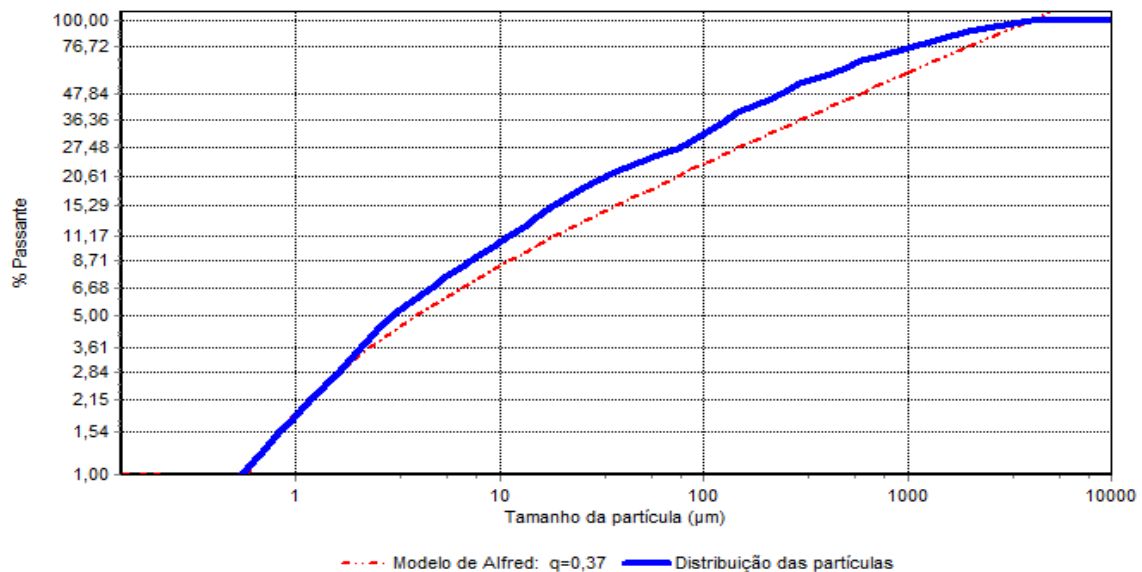
**Tabela 18** - Composição granulométrica da areia de escória de aciaria FEA ajustada pelo modelo de Alfred e pelo programa EMMA.

Peneira (mm)	2,36	1,18	0,60	0,30	0,150	0,075	<0,075
Distribuição ajustada (%)	5	20	28	17	10	10	10

Fonte: da autora.

No Gráfico 13 apresenta-se a curva granulométrica da argamassa utilizando a areia da norma francesa e cimento, simulados pelo programa EMMA.

**Gráfico 13** - Distribuição das partículas com a utilização da areia com a composição granulométrica da norma CSTB DTU 26.1/78 e cimento CP II E - 32



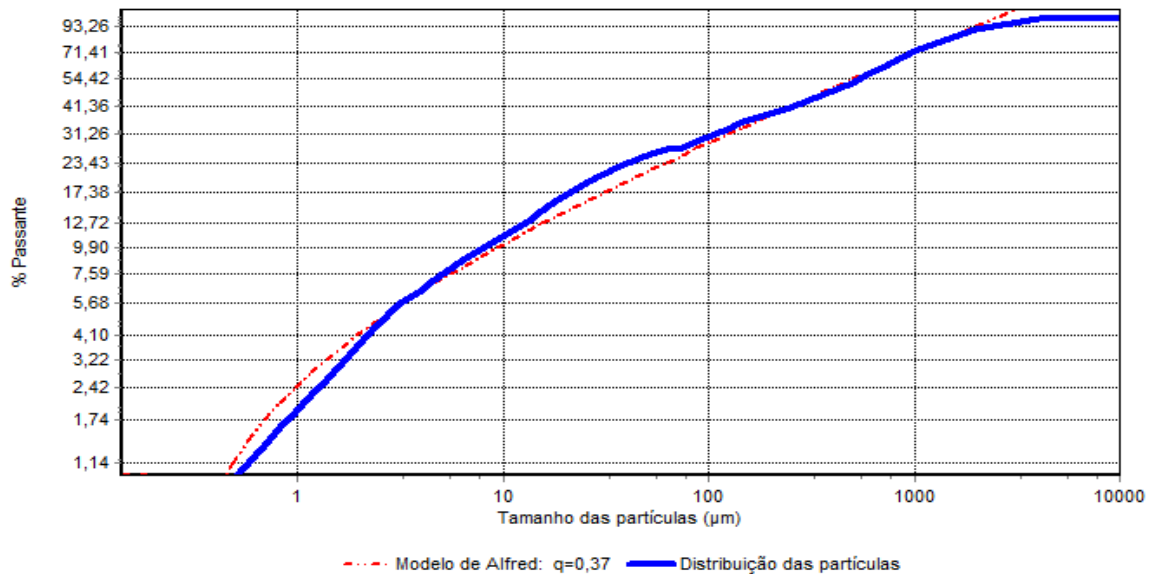
Fonte: da autora.

Verificou-se um afastamento da curva com a distribuição das partículas da argamassa composta com a areia da norma CSTB DTU 26.1/78 da curva do modelo de Alfred, isso indica que esta argamassa não possui o máximo empacotamento possível. Nota-se que as frações menores que 10  $\mu\text{m}$  estão bem próximas à curva do modelo e o maior afastamento ocorre a partir da peneira #200.

Assim optou-se por refinar a distribuição granulométrica da areia de forma que a curva da argamassa ficasse o mais semelhante possível do modelo de Alfred.

No Gráfico 14 apresenta-se a curva granulométrica da argamassa de areia de escória de aciaria FEA e cimento Portland formulada, baseado no modelo de Alfred e refinado com o auxílio do programa EMMA.

**Gráfico 14** – Distribuição das partículas da argamassa de escória de aciaria FEA comparada ao modelo de empacotamento de Alfred



Pode-se notar no Gráfico 14 que a distribuição das partículas se assemelha muito com a curva do modelo de Alfred. A faixa granulométrica que compreende as frações de 2400 a 75 µm se ajusta a curva de Alfred, mas nota-se um afastamento na faixa das frações de, aproximadamente, 75 a 7 µm. Com isso pode-se concluir que as faixas granulométricas conseguidas através de peneiramento, isto é, até onde se poderia controlar manualmente, estão ajustadas de maneira satisfatória.

#### 4.2.2 Estudo Preliminar – B

##### 4.2.2.1 Parte 1 – Seleção do esqueleto granular da areia de escória de aciaria FEA e pó de barita

Para definir a areia AE+B a ser utilizada neste trabalho foi necessário fazer primeiramente a verificação das massas unitárias das combinações, conforme Tabela 19 e Gráfico 15.

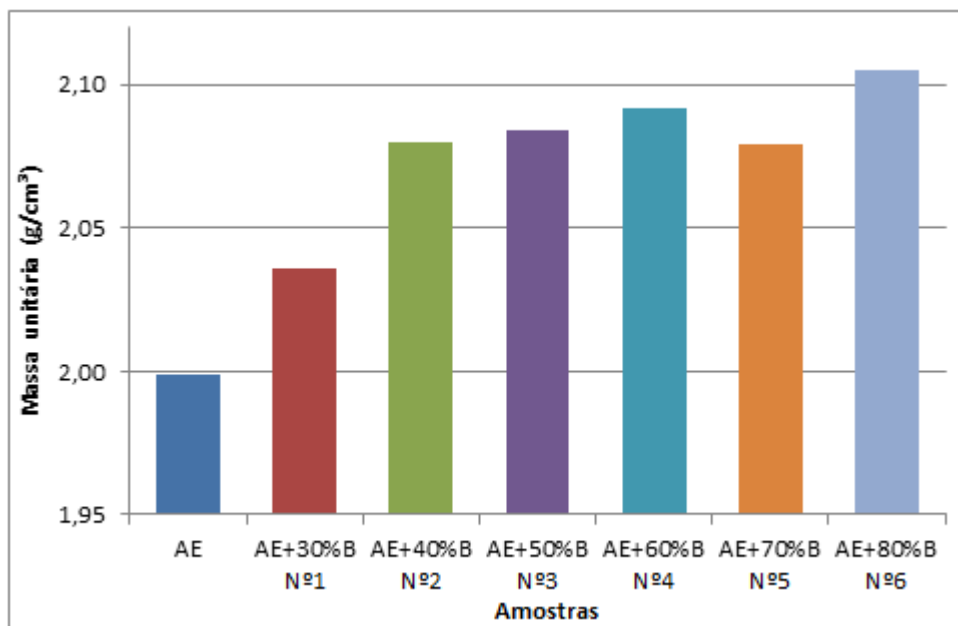
**Tabela 19** – Resultado das massas unitárias obtidas a partir de diferentes combinações de AE+B

Combinação	Amostras	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
-	AE	1,999
Nº1	AE + 30% de B	2,036
Nº2	AE + 40% de B	2,080
Nº3	AE + 50% de B	2,084
Nº4	AE + 60% de B	2,092
Nº5	AE + 70% de B	2,079
Nº6	AE + 80% de B	2,105

\*Porcentagem da barita em relação à massa de cimento

Fonte: da autora.

**Gráfico 15** – Comparação do resultado das massas unitárias obtidas a partir de diferentes combinações de AE+B



Fonte: da autora.

Baseado nas massas unitárias escolheram-se as combinações de números 2, 4 e 6 para a realização de um estudo preliminar, onde foram avaliadas somente as propriedades atenuadoras das argamassas produzidas com estas areias.

O critério de escolha das combinações se deu da seguinte maneira:

- Escolheu-se a areia nº 2 por ter maior massa unitária que a areia de nº 1;
- A areia nº 3 não foi escolhida porque apesar de apresentar uma massa unitária maior que a areia nº 2 também possuía 10% a mais de pó de barita, o que poderia requerer um maior consumo de água para uma variação pequena

de valor de massa unitária;

- Optou-se pelas areias de nº 4 e 6 por terem as massas unitárias significativamente maiores que as outras combinações.

#### 4.2.2.2 Parte 2 – Seleção da pasta

Os coeficientes de atenuação das seis argamassas obtidas a partir da combinação da AE com diferentes teores de barita estão apresentados na Tabela 20 e no Gráfico 16.

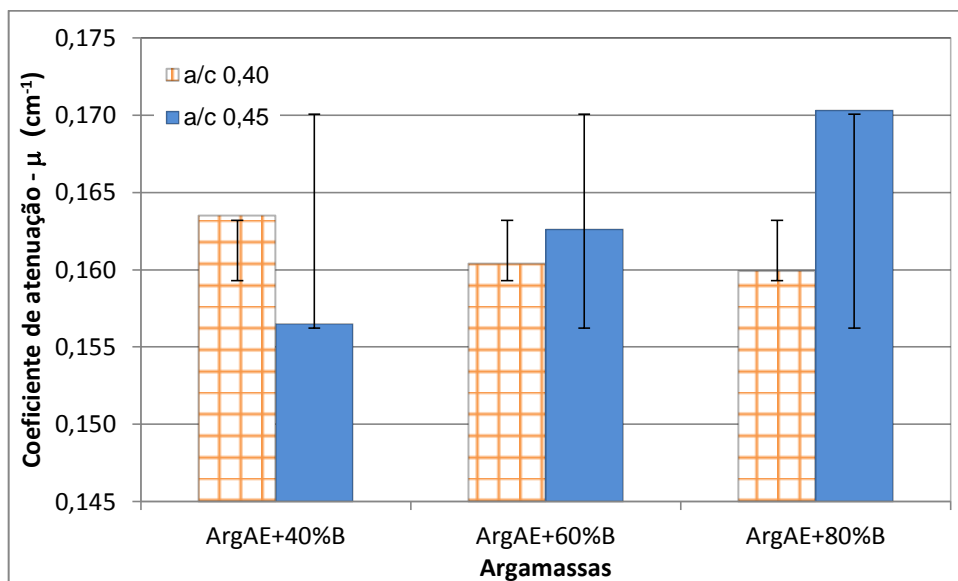
**Tabela 20** – Coeficiente de atenuação obtido através de argamassas com teores variáveis de barita

Combinação da areia	Relação a/c	Composição da argamassa	Coeficiente de atenuação $\mu$ (cm <sup>-1</sup> )
Nº2	0,40	ArgAE + 40% B	0,1635
Nº4		ArgAE + 60% B	0,1604
Nº6		ArgAE + 80% B	0,1599
Nº2	0,45	ArgAE + 40% B	0,1565
Nº4		ArgAE + 60% B	0,1626
Nº6		ArgAE + 80% B	0,1703

\*Porcentagem da barita em relação à massa de cimento

Fonte: da autora.

**Gráfico 16** – Comparação entre os coeficientes de atenuação obtidos com as argamassas com teores variáveis de barita



Fonte: da autora.

Através da Tabela 20 e do Gráfico 16 verifica-se que não há diferenças significativas entre as argamassas produzidas com 40% e 60% de barita no que diz respeito à relação a/c. Isto é, para estas duas porcentagens de barita podem ser utilizadas tanto a a/c 0,40 como a/c 0,45 que estatisticamente não há diferenças significativas, ver análise no Anexo A.

Isso está de acordo com o trabalho de Akkurt *et al.* (2006), onde eles encontraram coeficientes de atenuação linear ( $\mu$ ) de mesma magnitude para o mesmo agregado, embora as proporções diferentes de água/cimento.

Já ao comparar as duas argamassas produzidas com 80% de barita constata-se que elas diferem entre si, sendo assim, o maior coeficiente de atenuação foi obtido ao usar a relação a/c de 0,45. Relacionando com o Gráfico 12 da página 85, observa-se que esta relação foi a que apresentou a menor porosidade, sendo assim, era esperado que a argamassa que obtivesse a pasta menos porosa e a areia com maior massa unitária atingisse o maior coeficiente de atenuação de radiação.

Pode-se concluir que até 60% de barita a relação a/c não influenciou significativamente na melhoria do coeficiente de atenuação, mas com 80% de barita a relação a/c contribuiu com o aumento da atenuação de radiação.

Assim como nos trabalhos de Shirmardi *et al.* (2013) e Akkurt e El-Khayatt (2013), pode ser visto que os coeficientes de atenuação linear aumentaram com o acréscimo da concentração de barita na argamassa.

#### 4.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

Nos itens a seguir são apresentados os resultados dos ensaios obtidos com as argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B, em estado fresco.

##### 4.3.1 Massa Específica

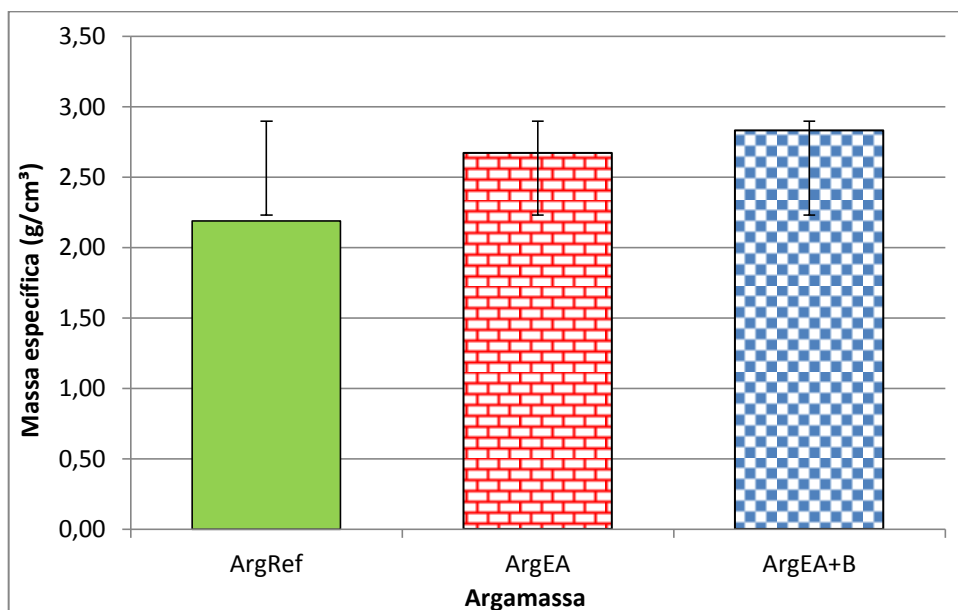
Os resultados do ensaio de massa específica da argamassa de referência (ArgRef), com escória (ArgEA) e com escória e barita (ArgEA+B), no estado fresco, são apresentados na Tabela 21 e Gráfico 17.

**Tabela 21** – Resultados do ensaio de massa específica das argamassas de referência, de escória e de escória e barita.

Argamassa	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	CV (%)
Argamassa de referência - (ArgRef)	2,19	0,03	1,31
Argamassa de escória (ArgEA)	2,67	0,03	0,99
Argamassa de escória e barita (ArgEA+B) – 80% de barita	2,83	0,02	0,72

Fonte: da autora.

**Gráfico 17** – Comparação entre as massas específicas das argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B



Fonte: da autora.

Verificou-se que as argamassas que possuem escória de aciaria em sua composição apresentam massas específicas maiores que a argamassa sem escória (argamassa de referência).

Barros e Macioski (2014) obtiveram valor semelhante para a massa específica da argamassa de referência, sendo o valor encontrado de 2,05 g/cm<sup>3</sup>, 6,39% inferior ao auferido neste trabalho.

Conforme Carasek (2010), a massa específica da argamassa pesada é superior a 2,30 g/cm<sup>3</sup>, assim pode-se classificar as argamassas ArgEA e ArgEA+B como argamassas pesadas e a ArgRef como uma argamassa convencional.

A ArgEA+B possui massa específica 22,61% superior a ArgRef e 5,65% maior que a ArgEA.

Ao analisar estatisticamente as argamassas, conforme exposto no Anexo A, pode-se concluir que todas as argamassas diferem estatisticamente, sendo a ArgEA+B a que apresenta a maior massa específica ao ser comparada com as outras argamassas.

#### 4.3.2 Índice de Consistência

Na Tabela 22 são apresentados os resultados do ensaio de consistência das argamassas de referência (ArgRef), com escória (ArgEA) e com escória e barita (ArgEA+B).

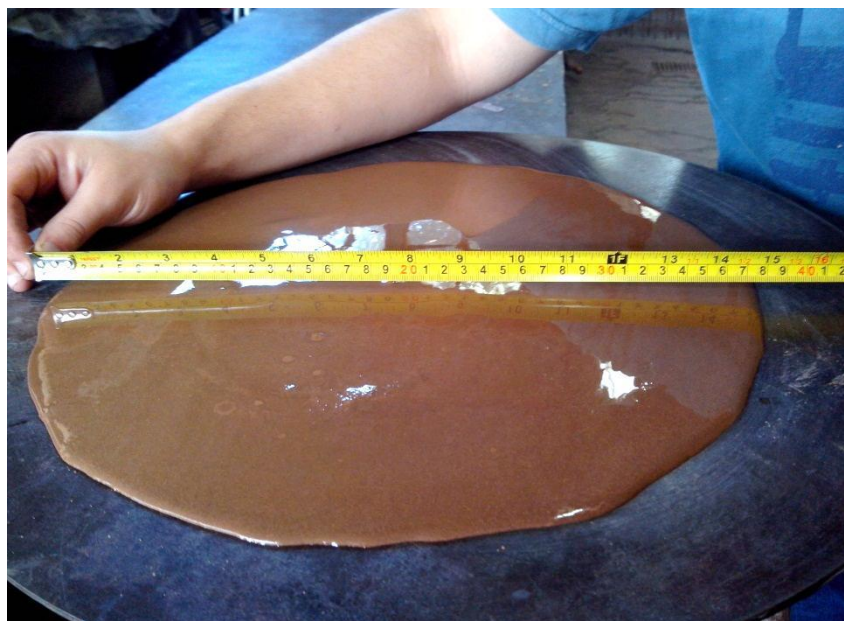
**Tabela 22** - Resultados do ensaio de consistência das argamassas de referência, de escória e com combinação de escória e barita.

Argamassa	Consistência (cm)	Água/materiais secos
Argamassa de referência (ArgRef)	37	0,200
Argamassa de escória (ArgEA)	24,5	0,080
Argamassa de escória e barita (ArgEA+B)	25,5	0,078

**Fonte:** da autora.

Nas Figuras 33, 34 e 35 podem-se visualizar os resultados dos ensaios de consistência das argamassas de referência, de escória e com combinação de escória e barita, respectivamente.

**Figura 33** - Índice de consistência da argamassa de referência (ArgRef)



**Fonte:** da autora.

**Figura 34** - Índice de consistência da argamassa de escória (ArgEA)



Fonte: da autora.

**Figura 35** - Índice de consistência da argamassa de escória e barita (ArgEA+B)



Fonte: da autora.

Conforme a Tabela 22 e as Figuras 33, 34 e 35 verifica-se que a argamassa de referência é mais fluída que as argamassas ArgEA e ArgEA+B, mesmo tendo-se utilizado a dosagem indicada pelo fabricante e sendo esta argamassa especificada para revestimento.

Nas argamassas ArgEA e ArgEA+B, a baixa relação água/cimento contribuiu para a consistência menos fluida destas argamassas.

Observa-se também que nenhuma das argamassas sofreu com efeitos de segregação e exsudação.

#### 4.4 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Nos itens a seguir são apresentados os resultados dos ensaios obtidos com as argamassas de referência (ArgRef), com escória (ArgEA) e com escória e barita (ArgEA+B), no estado endurecido.

##### 4.4.1 Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados com as argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B nas idades de 7 e 28 dias, conforme indicado no Quadro 14, página 66.

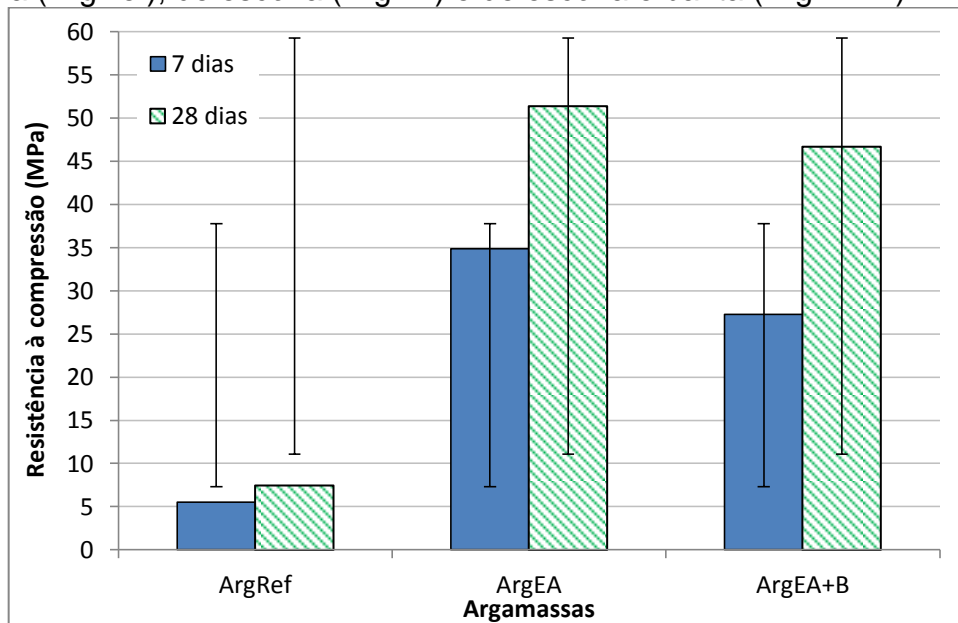
Na Tabela 23 e o Gráfico 18 apresentam-se os resultados do ensaio de resistência à compressão para as argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B, aos 7 e 28 dias.

**Tabela 23** - Resultados do ensaio de resistência à compressão para as argamassas na idade de 7 e 28 dias

Argamassa	Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	Desvio Padrão - 7 dias	CV - 7 dias (%)	Desvio Padrão - 28 dias	CV - 28 dias (%)
ArgRef	5,52	7,46	0,53	9,54	0,36	4,84
ArgEA	34,74	51,62	3,63	10,46	1,91	3,70
ArgEA+B	27,23	46,69	3,98	14,61	4,51	9,66

Fonte: da autora.

**Gráfico 18** – Comparação entre as resistências à compressão da argamassa de referência (ArgRef), de escória (ArgEA) e de escória e barita (ArgEA+B)



Fonte: da autora.

Com base nos resultados verificou-se que, como esperado, houve um aumento da resistência das argamassas com o passar do tempo. A resistência aos 28 dias da argamassa de referência (ArgRef) foi 35,14% maior que a resistência aos 7 dias.

A argamassa de escória (ArgEA) aos 28 dias apresentou resistência à compressão 48,59% maior que a mesma argamassa na idade de 7 dias. E notou-se um aumento de 71,46% na resistência à compressão da argamassa de escória e barita (ArgEA+B) se comparando os corpos de prova na idade de 7 e 28 dias.

A ArgEA foi a que apresentou os maiores valores de resistência à compressão, tanto aos 7 como aos 28 dias.

Estatisticamente, notou-se que aos 7 e 28 dias os resultados de todas as argamassas diferiram significativamente e que a ArgEA apresentou o melhor desempenho nas duas idades. Isto significa que se fosse para escolher a melhor argamassa considerando somente a resistência à compressão a ArgEA seria a melhor opção.

Notou-se que o refinamento do esqueleto granular e da pasta acarretou em um desempenho superior das propriedades mecânicas exigidas para argamassa de revestimento.

#### 4.4.2 Resistência à Tração

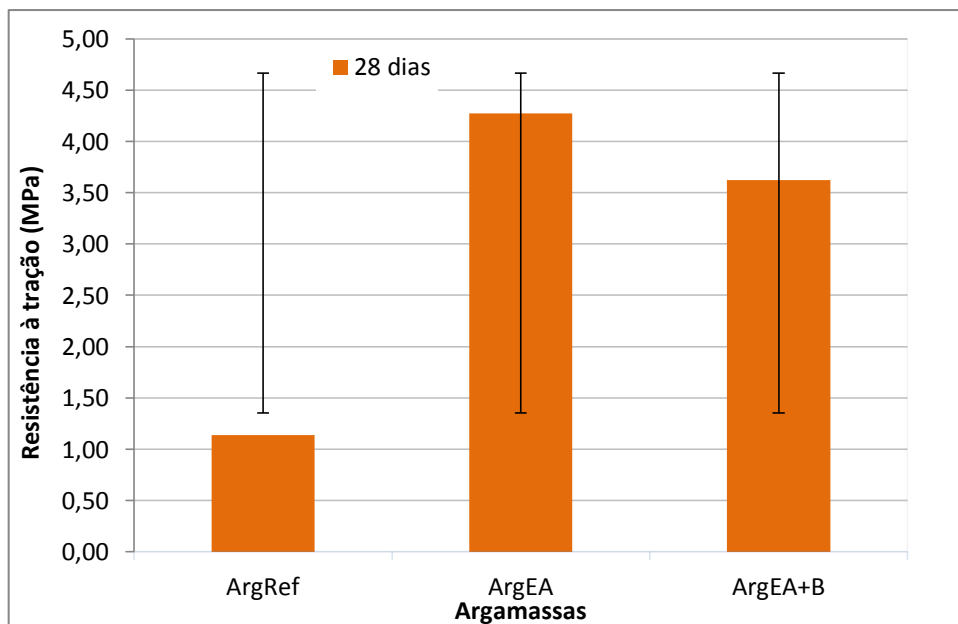
Os valores dos resultados de resistência à tração aos 28 dias são apresentados na Tabela 24 e no Gráfico 19.

**Tabela 24** - Resultados do ensaio de resistência à tração para as argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B

Resistência à tração	Resistência à tração (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
ArgRef	1,14	0,18	15,86
ArgEA	4,27	0,73	17,13
ArgEA+B	3,62	0,44	12,16

Fonte: da autora.

**Gráfico 19** – Comparação entre as resistências à tração das argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B



Fonte: da autora.

Verificou-se que a ArgEA obteve a maior resistência à tração, sendo 73,30% maior que a ArgRef e 15,22% superior a ArgEA+B.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), pode-se relacionar a resistência à compressão com à tração, mas não de uma maneira direta. Sendo assim, o aumento da resistência à compressão implica no aumento da resistência à tração, mas não de forma proporcional.

“A relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão é da ordem de 10 a 11% para o concreto de baixa resistência, de 8 a 9% para o concreto de média resistência e de 7% para o de alta resistência” (Mehta e Monteiro, 2014).

Ao comparar as resistências a compressão e à tração das argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B notou-se que as relações entre as resistências não seguiu o proposto por Mehta e Monteiro (2014) para o concreto. A ArgRef obteve uma relação de 15,46%, a ArgEA de 8,31% e a ArgEA+B de 7,75%, entre as resistências de tração e compressão.

Isto pode ter sido em virtude do agregado utilizado, que no caso das argamassas deste trabalho eram agregados pesados, que possuem uma resistência menor que agregados de basalto ou granito, e por ser argamassa e não concreto. Segundo Farias e Palmeira (2010), “a composição mineralógica dos agregados, bem como sua porosidade, afeta a resistência, compressibilidade e a sanidade dos concretos endurecidos”.

#### 4.4.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

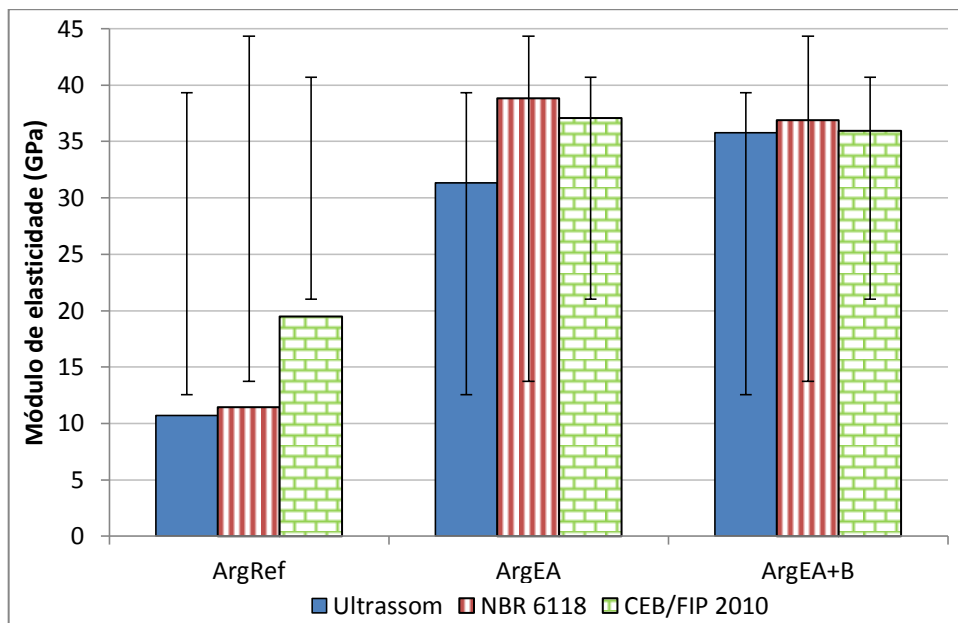
Na Tabela 25 e no Gráfico 20 apresentam-se a comparação entre as resistências à compressão, massa específica no estado endurecido e módulo de elasticidade das argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B.

**Tabela 25** - Resultados das resistências à compressão, das massas específica e dos módulos de elasticidade da argamassa de referência (ArgRef), de escória (ArgEA) e de escória e barita (ArgEA+B)

Argamassa	Massa específica – estado endurecido (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade de propagação (m/s)	Módulo de elasticidade (GPa)			Desvio Padrão - ultrassom	CV – ultrassom (%)
			Ultrassom	NBR 6118/2007	CEB/FIP 2010		
ArgRef	2,06	2402,00	10,70	11,42	19,50	0,11	0,02
ArgEA	2,59	4016,20	31,33	38,82	37,10	0,48	1,53
ArgEA+B	2,67	3859,80	35,85	36,89	35,93	0,62	1,74

Fonte: da autora.

**Gráfico 20** - Comparação entre os módulos de elasticidade da argamassa de referência (ArgRef), de escória (ArgEA) e de escória e barita (ArgEA+B)



**Fonte:** da autora.

Ao comparar os módulos de elasticidade dinâmico, ultrassom, das argamassas nota-se que a ArgEA+B obteve o maior módulo, sendo 70,08% superior ao resultado da ArgRef e 12,31% maior que a ArgEA.

Após análise estatística, conforme Anexo A, página 119, verificou-se que com relação ao módulo de elasticidade obtido pelo ultrassom todos os tratamentos diferiram entre si.

No que diz respeito à massa específica, a média da ArgEA e ArgEA+B não diferiram significativamente entre si, mas diferiram da ArgRef.

Geralmente, no ensaio de módulo de elasticidade pelo método de ultrassom, os compósitos que possuem massas específicas maiores apresentam velocidades de propagação maiores. Isto se justifica pela massa específica do concreto e/ou argamassa ser um dos fatores determinantes da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Outros fatores determinantes são o tipo de agregado, a relação água/cimento, a granulometria dos agregados (PUNDIT MANUAL, 1994 apud EVANGELISTA, 2002).

De acordo com Silva e Campiteli (2008), com o aumento da compacidade da argamassa tem-se um aumento na velocidade de propagação da onda ultrassônica para um menor tempo de propagação da onda, o que proporciona assim um maior módulo de elasticidade.

Através da Tabela 25 e do Gráfico 20, observa-se o contrário, a velocidade de propagação na ArgEA foi maior que a apresentada na ArgEA+B, apesar desta argamassa apresentar massa mais densa.

Acredita-se que, apesar da massa específica da ArgEA+B ser maior, a velocidade de propagação foi menor em virtude de sua menor resistência, que pode ser devido ao acréscimo de água na mistura para compensar a absorção de água da escória de aciaria e da barita. Outros fatores como a granulometria, massa unitária, fração volumétrica, forma e módulo de deformação dos principais componentes também podem ter afetado o desempenho elástico do compósito (BENETTI, 2012).

Nota-se que, a literatura a respeito de módulo de elasticidade admite uma divergência de 20% a 40% entre o módulo dinâmico e o módulo estático. para os concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

#### 4.4.4 Absorção de Água

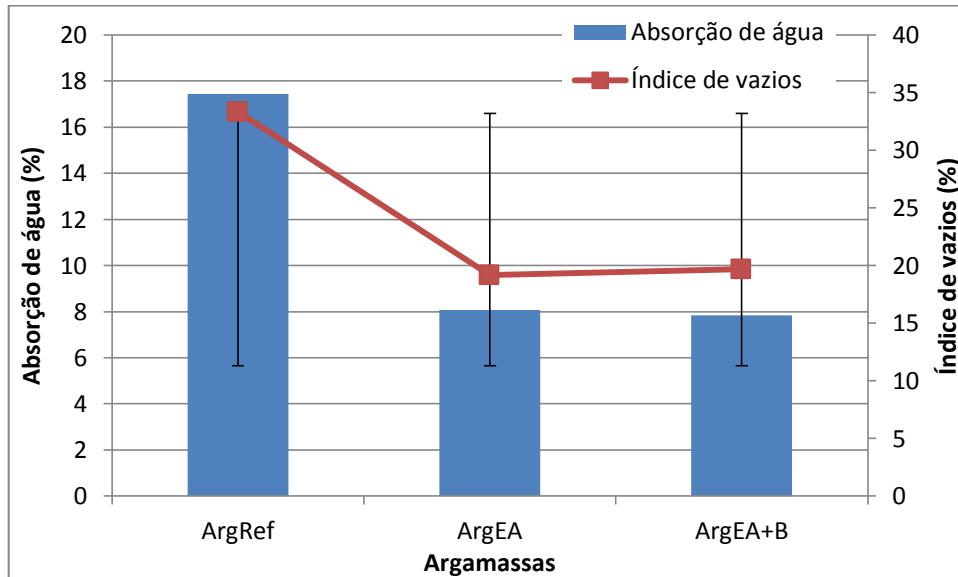
Os resultados das argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B são demonstrados na Tabela 26 e Gráfico 21.

**Tabela 26** - Ensaio de absorção de água para a argamassa com combinação de escória e barita na idade de 28 dias.

Argamassa	Absorção aos 28 dias (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (%)	Desvio Padrão	CV (%)
ArgRef	17,45	2,15	33,34	0,01	3,71
ArgEA	8,08	2,55	19,16	0,01	8,23
ArgEA+B	7,84	2,68	19,67	0,01	2,35

Fonte: da autora.

**Gráfico 21** - Comparação entre a absorção de água e índice de vazios das argamassas de referência (ArgRef), de escória (ArgEA) e de escória e barita (ArgEA+B)



Fonte: da autora.

Observa-se que com relação à absorção de água e índice de vazios não há diferenças significativas entre as argamassas ArgEA e ArgEA+B, isto é, estatisticamente as duas argamassas são iguais. Porém, ao comparar estas duas argamassas com a ArgRef obtiveram-se diferenças significativas, ressaltando esta argamassa de referência como a que mais absorveu água e, conseqüentemente, apresentou o maior índice de vazios.

Barros e Macioski (2014) ensaiaram uma argamassa baritada e encontraram valores diferentes para a absorção de água e índice de vazios, sendo, respectivamente, 11 e 23%. Esta diferença entre resultados pode ter sido devido à utilização de argamassas baritadas de marcas diferentes e com consistências de pasta diferentes.

Verificou-se que a ArgRef apresentou uma absorção de água 53,70% maior que a ArgEA e 55,07% superior a ArgEA+B.

Notou-se que o aumento da massa específica das argamassas experimentais em relação a referência resultou em argamassas menos porosas, isto pode ter sido devido ao maior empacotamento das partículas, resultante dos Estudos Preliminares A e B.

#### 4.4.5 Absorção de Água por Capilaridade

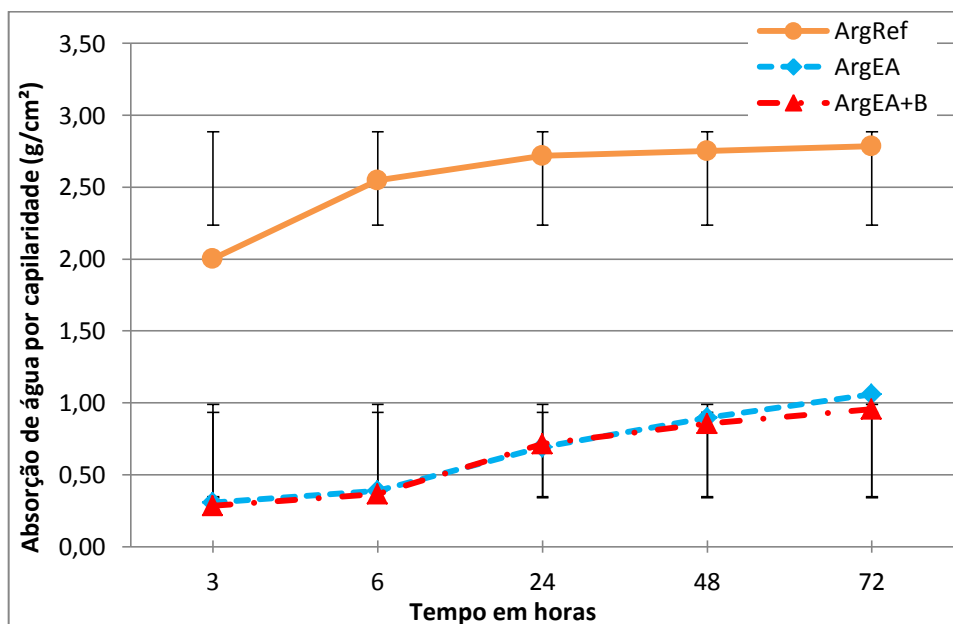
Na Tabela 27 e Gráfico 22 são apresentados os resultados medidos para as argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B.

**Tabela 27** – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade para as argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B

Absorção de água por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )							
Argamassa	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas	Desvio Padrão - médio	CV - médio (%)
ArgRef	2,00	2,55	2,71	2,75	2,79	0,25	2,51
ArgEA	0,31	0,39	0,69	0,90	1,06	0,13	5,13
ArgEA+B	0,29	0,37	0,71	0,86	0,96	0,08	15,22

Fonte: da autora.

**Gráfico 22** - Comparação dos resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas de referência (ArgRef), de escória (ArgEA) e de escória e barita (ArgEA+B)



Fonte: da autora.

Por meio desse ensaio pode-se fazer um paralelo com o ensaio de absorção de água por imersão e o de resistência à compressão. O Gráfico 22 demonstra que a que a absorção de água por capilaridade da ArgRef foi superior as argamassas ArgEA e ArgEA+B. Isto confirma o ensaio de absorção de água, onde a

ArgRef também apresentou resultados superiores aos das outras argamassas. Com relação à resistência à compressão, observou-se que a ArgRef teve o pior desempenho entre as argamassas testadas, isto pode ser correlacionado com uma maior porosidade que pode ter contribuído para aumentar o coeficiente de absorção.

O ensaio com ArgRef teve que ser repetido duas vezes para confirmar que a ascensão de água se deu em toda a altura do corpo de prova.

Na Figura 36 apresenta-se uma comparação entre um corpo de prova da ArgRef submetido ao ensaio de capilaridade e um corpo de prova que não foi ensaiado.

**Figura 36** – Ensaio de absorção de água por capilaridade para a argamassa de referência (ArgRef): a) corpo de prova após ensaio b) corpo de prova não submetido ao ensaio

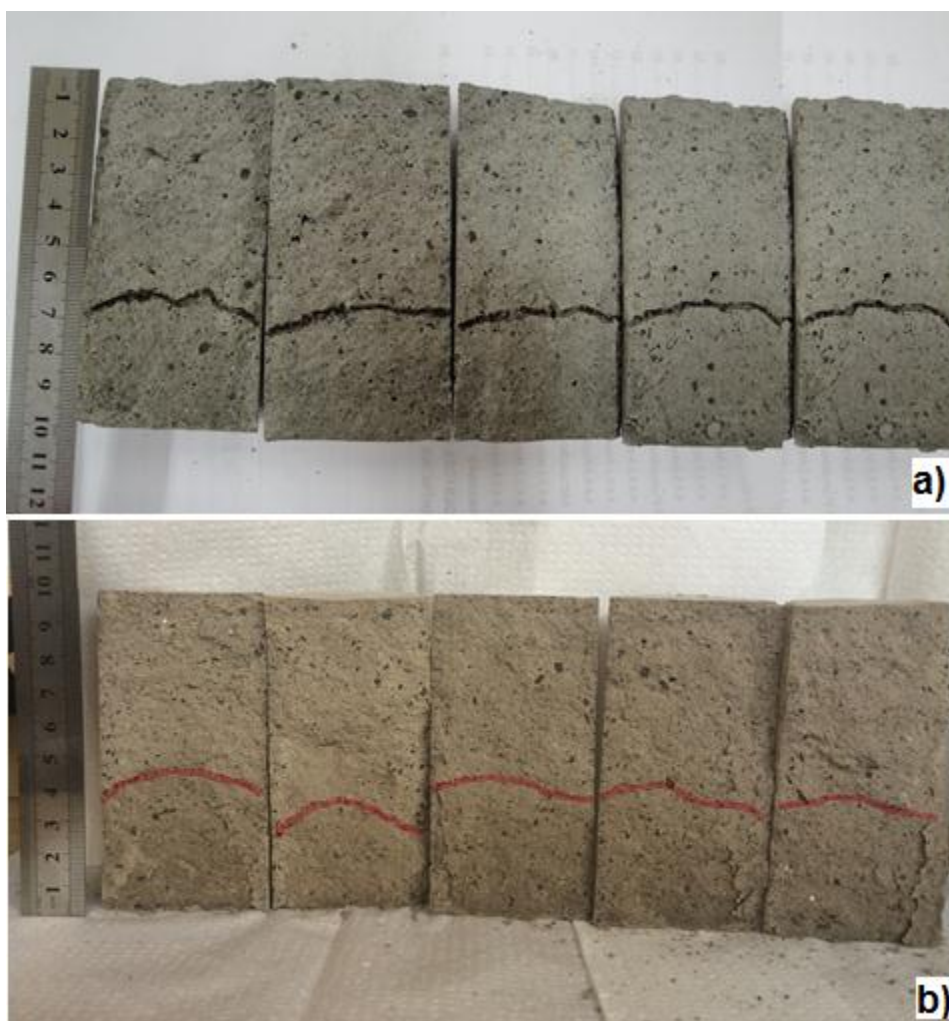


Fonte: da autora.

Nota-se pela diferença de coloração que no corpo de prova que foi ensaiado ocorreu absorção de água por toda a sua superfície.

A Figura 37 apresenta os corpos de prova das argamassas ArgEA e ArgEA+B.

**Figura 37** – Absorção de água por capilaridade: a) argamassa de escória (ArgEA); b) argamassa de escória e barita (ArgEA+B)



Fonte: da autora.

Observa-se que a altura de absorção de água é bem semelhante entre as duas argamassas, reforçando a conclusão obtida através do Gráfico 22 de que a curva de absorção por capilaridade das argamassas ArgEA e ArgEA+B se assemelham, demonstrando que a inclusão do pó de barita não causou um aumento da absorção de água.

#### 4.4.6 Atenuação de Radiação

Na Tabela 28 são apresentados os resultados dos coeficientes de atenuação de radiação obtidos para as argamassas.

**Tabela 28** – Resultados dos coeficientes de atenuação de radiação obtidos para as argamassas ArgRef, ArgEA e ArgEA+B

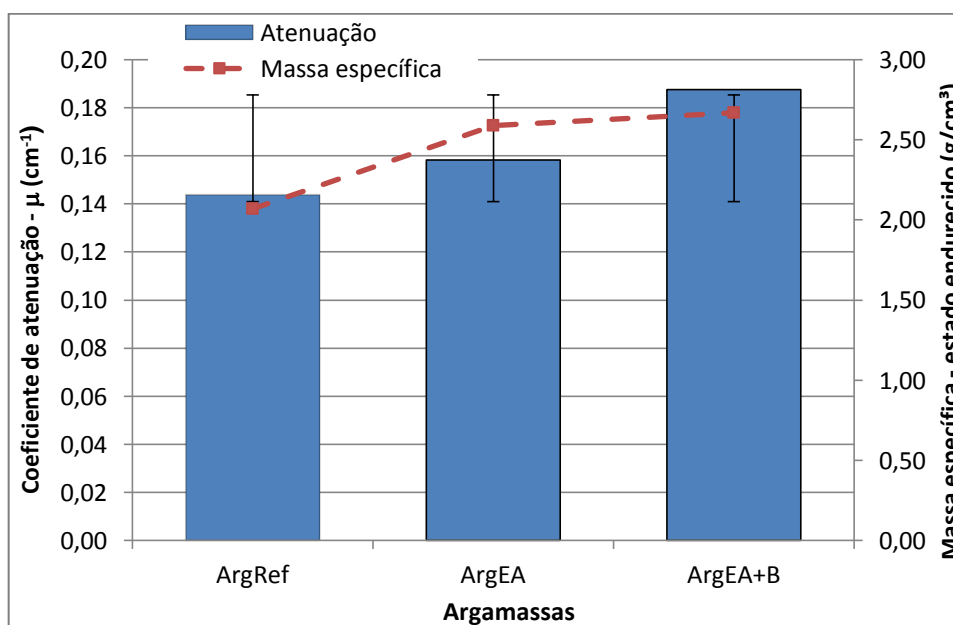
Argamassa	Coefficiente de atenuação de radiação (cm <sup>-1</sup> )	Desvio Padrão	CV (%)
ArgRef	0,1438	0,00	2,58
ArgEA	0,1584	0,01	8,40
ArgEA+B	0,1875	0,00	0,52

Fonte: da autora.

Ao analisar os resultados da Tabela 28 verifica-se que a ArgEA+B possui o maior coeficiente de atenuação de radiação, sendo 23,30% maior que a ArgRef e 15,52% superior a ArgEA. Comparando estatisticamente as argamassas, conforme Anexo A, nota-se que todos os resultados diferem entre si e a o melhor tratamento confirmou-se como sendo a ArgEA+B.

No Gráfico 23 é feita uma comparação entre os coeficientes de atenuação das argamassas e as respectivas massas específicas no estado endurecido.

**Gráfico 23** - Comparação entre os coeficientes de atenuação das argamassas e as respectivas massas específicas no estado endurecido



Fonte: da autora.

Conforme se observa no Gráfico 23, o coeficiente de atenuação de radiação foi proporcional à massa específica, assim fica evidente que os Estudos Preliminares A e B atingiram seu propósito em obter argamassas experimentais com

pastas menos porosas e esqueletos granulares mais compactos, conseqüentemente, proporcionando argamassas com capacidade de atenuação maior que a argamassa de referência.

A proporcionalidade entre massa específica e atenuação de radiação também foi observada nos trabalhos de Shirmardi *et al.* (2013), Yilmaz *et al.* (2011) e González-Ortega *et al.* (2014).

#### 4.4.6.1 Cálculo da espessura de atenuação de radiação

Para calcular a espessura necessária para reduzir a intensidade do feixe de radiação à metade do valor inicial (CSR) utilizou-se a Equação 3, página 26.

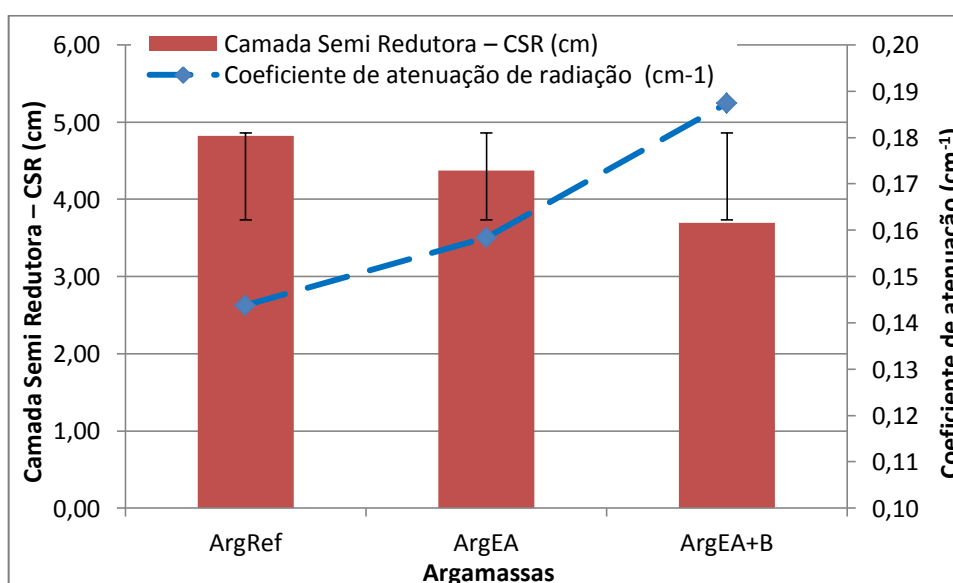
Os resultados obtidos para as argamassas são expostos na Tabela 29 e no Gráfico 24.

**Tabela 29** - Coeficientes de atenuação das argamassas e as respectivas espessuras de Camada Semi Redutora

Argamassa	Coeficiente de atenuação de radiação ( $\text{cm}^{-1}$ )	Camada Semi Redutora – CSR (cm)
ArgRef	0,1438	4,82
ArgEA	0,1584	4,38
ArgEA+B	0,1875	3,70

Fonte: da autora.

**Gráfico 24** – Comparação entre os coeficientes de atenuação das argamassas e as respectivas espessuras de Camada Semi Redutora



Fonte: da autora.

Notou-se através do Gráfico 24 que quanto maior o coeficiente de atenuação de radiação de um material menor é a camada necessária para atenuar uma mesma energia, isto é, quanto mais compacto e denso é o material menor a espessura do material absorvedor.

Verificou-se que para absorver 50% do feixe inicial da energia de radiação gama do Césio-137 seria necessária uma espessura de ArgRef 10% maior que a espessura da ArgEA e 23,23% superior a espessura da ArgEA+B.

Assim, pode-se concluir que a ArgEA+B apresenta o melhor desempenho como material atenuador se comparada com a ArgRef e ArgEA.

De acordo com IAEA (1996), o valor da camada semi-redutora do chumbo é de 0,65 cm enquanto a da ArgRef é de 4,82 cm, a da ArgEA é igual a 4,38 cm e da ArgEA+B é de 3,70 cm, sendo maiores que a camada do chumbo.

#### 4.5 TABELA COMPARATIVA DO DESEMPENHO ESTATÍSTICO DAS ARGAMASSAS CONFORME OS ENSAIOS

Na Tabela 30 é apresentado um resumo do desempenho estatístico das argamassas. Os resultados estatísticos detalhados são exibidos no Anexo A, página 119.

**Tabela 30** - Tabela comparativa do desempenho estatístico das argamassas conforme os ensaios

Ensaio	Teste de Tukey			Teste HSU (Tratamento com melhor desempenho)
	ArgRef	ArgEA	ArgEA+B	
Massa específica – fresco	a	b	c	ArgEA+B
Resistência à compressão	a	b	c	ArgEA
Resistência à tração	a	b	b	ArgEA
Módulo – ultrassom	a	b	c	ArgEA
Massa específica – endurecido	a	b	b	ArgEA+B
Absorção de água	a	b	b	ArgRef*
Índice de vazios	a	b	b	ArgRef*
Absorção – Capilaridade	a	b	b	ArgRef*
Atenuação de radiação	a	b	c	ArgEA+B

No caso das argamassas marcadas com o símbolo (\*) não significa que apresentaram o melhor desempenho, mas sim o maior resultado se comparado com as outras argamassas analisadas.

**Fonte:** da autora.

A partir da Tabela 30 verifica-se que estatisticamente a argamassa de referência obteve a maior absorção de água, tanto por imersão como por capilaridade e, conseqüentemente, maior índice de vazios. Para fins de proteção de radiação foi a argamassa que obteve o pior desempenho.

A argamassa de escória (ArgEA) alcançou os melhores resultados com relação a resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade.

A argamassa de escória e barita (ArgEA+B) apresentou o melhor desempenho nos ensaios de massa específica no estado fresco e endurecido e obteve o maior coeficiente de atenuação de radiação, assim sendo considerada a melhor argamassa experimental para este fim.

## 5 CONCLUSÃO

A massa específica de um material depende de sua natureza mineralógica, o que não pode ser alterado, e, para viabilizar a produção de argamassa com função de proteção contra radiação, é necessário que seus componentes sejam os mais compactos possíveis.

Baseado neste princípio, este trabalho se fundamentou em obter a pasta com a menor porosidade e a areia com a composição granulométrica de maior compacidade, viabilizando a produção de uma argamassa pesada. Para atingir esse propósito, utilizou-se como agregado pesado a escória de aciaria (FEA), que é um coproduto subutilizado da produção do aço em forno elétrico a arco.

O objetivo do trabalho foi atendido, uma vez que as argamassas elaboradas com escória de aciaria de forno elétrico como agregado pesado (ArgEA e ArgEA+B) apresentaram coeficientes de atenuação superiores ao da argamassa de referência (ArgRef), essa composta apenas com agregado barítico. Comprovou-se ser possível produzir argamassa pesada com a finalidade de atenuar radiação com areia de escória (FEA) em substituição a barita.

No que diz respeito ao objetivo específico, o potencial de atenuação de radiação das argamassas é inferior perante a capacidade de atenuação do lençol de chumbo, porém as argamassas formuladas neste trabalho se mostraram ser mais adequadas que a argamassa de referência (argamassa baritada comercial).

Por meio dos Estudos Preliminares A e B, notou-se que o refinamento do esqueleto granular e a diminuição da porosidade da pasta contribuíram para a obtenção de argamassas mais densas e compactas.

O *software* EMMA se mostrou útil ao ser capaz de ajustar a composição granulométrica de forma a se assemelhar ao modelo de Alfred e, assim, proporcionar areia com maior empacotamento de partículas.

No Estudo Preliminar A, a relação água/cimento de 0,40 com e sem aditivo apresentou a menor porosidade, sendo a relação a/c com aditivo escolhida para produzir a argamassa de escória de aciaria por apresentar melhor trabalhabilidade.

No Estudo Preliminar B, escolheu-se a argamassa com teor de barita de 80% em sua composição devido a sua maior massa e maior coeficiente de atenuação de radiação. Verificou-se ainda que a massa unitária da areia com

combinação de escória de aciaria e barita aumentou com o acréscimo de pó de barita na mistura.

As argamassas que continham agregado siderúrgico em sua composição obtiveram resultados, em relação à argamassa de referência, superiores nos ensaios de resistências à compressão e à tração, módulo de elasticidade e atenuação de radiação.

O ensaio de absorção de água por capilaridade validou o ensaio de absorção de água por imersão, uma vez que, nos dois ensaios a argamassa de referência (ArgRef) apresentou a maior absorção de água e índice de vazios.

Através do ensaio de atenuação de radiação, comprovou-se que a massa específica de um material está diretamente relacionado com o potencial de blindagem de energia radioativa. De modo que a argamassa que possui maior massa específica necessita de uma menor espessura para atenuar a mesma intensidade de radiação. Neste contexto, a argamassa ArgEA+B, que obteve o melhor índice de atenuação, foi também a que apresentou maior massa específica.

A utilização da combinação de agregado siderúrgico e agregado barítico contribuiu para a elevação do coeficiente de atenuação da argamassa, tornando-se uma alternativa de destinação da escória de aciaria e como uma opção à argamassa baritada comercial.

Com relação à análise estatística dos rendimentos obtidos pelas argamassas deste trabalho, concluiu-se que a argamassa de escória e barita (ArgEA+B) apresentou os melhores resultados nos ensaios de massa específica e atenuação de radiação, reafirmando esta argamassa como a melhor opção para utilização em fins de proteção radiológica.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Estudar a produção de argamassa pesada somente com agregados baríticos utilizando a distribuição granulométrica proposta neste trabalho e verificar a capacidade de atenuação de radiação;
- Avaliar a escória de aciaria (FEA) com relação à toxicidade devido à presença de impurezas em sua composição;
- Avaliar o desempenho do revestimento de argamassa de escória e barita e de argamassa de escória;
- Avaliar a substituição da barita por outros agregados pesados, como hematita e magnetita, quanto à atenuação de raios-X para aplicação em proteção radiológica.

**BIBLIOGRAFIA**

AKKURT, I.; BASYIGIT, C.; KILINCARSLAN, S.; MAVI, B. **The shielding of  $\gamma$ -rays by concretes produced with barite**. Progress in Nuclear Energy 46, Issue 1, p. 1-11, 2005. doi:10.1016/j.pnucene.2004.09.015

AKKURT, I.; BASYIGIT, C.; KILINCARSLAN, S.; MAVI, B.; AKKURT, A. **Radiation shielding of concretes containing different aggregates**. Cement and Concrete Composites 28, Issue 2, p. 153-157, 2006. doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.09.006

AKKURT, I.; EL-KHAYATT, A. M. **The effect of barite proportion on neutron and gamma-ray shielding**. Annals of Nuclear Energy 51, p. 5-9, 2013. doi:10.1016/j.anucene.2012.08.026

AKKURT, I.; BASYIGIT, C.; KILINÇARSLAN, S.; MAVI, B.; GUNOGLU, K. **Determination of some heavyweight aggregate half value layer thickness used for radiation shielding**. Acta Physica Polonica 121, p. 138 -140, 2012.

ANDREUCCI, R. **Curso básico de proteção radiológica**. 4ed. São Paulo: Abende, 2002. Disponível em: <[http://uab.ufac.br/moodle/pluginfile.php/6733/mod\\_resource/content/1/CURSO%20B%C3%81SICO%20DE%20RADIOPROTE%C3%87%C3%83O.pdf](http://uab.ufac.br/moodle/pluginfile.php/6733/mod_resource/content/1/CURSO%20B%C3%81SICO%20DE%20RADIOPROTE%C3%87%C3%83O.pdf)>. Acesso em: 28 set. 2014.

BARROS, F. S.; MACIOSKI, G. **Caracterização de argamassas para proteção**. In: 69º Congresso anual da ABM. São Paulo. Revista ABM, 201, 2014.

BARROS, F. S.; SCHELIN, H. R.; COSTA, P. R.; TILLY Jr.; J. G.. **Determinação das Propriedades de Atenuação de Tijolos Cerâmicos Maciços para a sua Utilização como Barreira de Proteção em Salas de Radiodiagnóstico**. In: II Congresso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica – Habana. Havana, Cuba, p. 23-25, 2001.

BEAUDOIN, J. J.; FELDMAN, R. F.; TUMIDAJSLI, P. J. **Pore structure of hardened Portland cement pastes and its influence on properties**. Advanced Cement Based Materials, v. 1, n. 5, p. 224-236, jul. 1994.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 83p. 2012.

BERNARDES, E. E.; DE MAGALHÃES, A. G.; VASCONCELOS, W. L.; NUNES, E. H. M. **Avaliação do efeito da variação da trabalhabilidade na estrutura de poros do concreto pelo uso da microtomografia de raios X**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. Volume 6, Number 4, p. 582-597, 2013. ISSN 1983-4195

BINICI, H.; AKSOGAN, O.; SEVINC, A. H.; KUCUKONDER, A. **Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with colemanite, barite,**

**ground basaltic pumice and ground blast furnace slag.** Construction and Building Materials 50, p. 177–183, 2014.

BITELLI, T. **Dosimetria e higiene das radiações.** São Paulo: Grêmio Politécnico, 1982.

BONIN, L. C.; FEUERHARMEL, C.; CARNEIRO, A. M. P. **Estudo da influência da distribuição granulométrica da areia na trabalhabilidade da argamassa.** In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Vitória, ES, p. 371-378, 1999.

BRASIL. Adiel de Macêdo Véras. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Balanco Mineral Brasileiro 2001.** Brasília: DNPM, 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/barita.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2014.

BRASIL. Roberto Moscoso de Araújo. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2013: Barita.** Brasília: DNPM, 2013. Disponível em: <[https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8966](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8966)>. Acesso em: 04 set. 2014.

CAMPITELLI, V. **Porosidade do concreto.** São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1987, p. BT-PCC 09/87.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. et al. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. v. 2. cap. 26, p. 893-944.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 213 p., 1999.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A., **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/237, São Paulo, 1999.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. **A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassas.** Ambiente Construído, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 37-44, 1997.

CARNEIRO, A. M. P.; REGIS, P.; OLIVEIRA, J. F.; SILVA, A. P. **Estudo da influência da porosidade de argamassas colantes em algumas propriedades no estado endurecido.** In: 1º Congresso Português de Argamassas e ETICS. APFAC: Lisboa, Portugal, 2005.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V.C. **Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional.** Cerâmica 55, p. 233-251, 2009.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V.C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** Cerâmica 55, p. 18-32, 2009.

CHEN, X.; WU, S.; ZHOU, J. **Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar.** Construction and Building Materials 40, p. 869–874, 2013.

CIMENTO ITAMBÉ. **Especificações.** Disponível em: <[http://cimentoitambe.com.br/cimentos/especificacoes\\_abnt.pdf](http://cimentoitambe.com.br/cimentos/especificacoes_abnt.pdf)>. Acesso em: 09 jul. 2013.

COELHO, J. M. J. Mendo Consultoria. **Relatório Técnico 42: Perfil da Barita.** Brasil: 2009. 54 p. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano\\_duo\\_decenal/a\\_mineracao\\_br\\_asileira/P28\\_RT42\\_Perfil\\_da\\_Barita.pdf](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_mineracao_br_asileira/P28_RT42_Perfil_da_Barita.pdf)>. Acesso em: 09 out. 2013.

COSTA, P. R. **Modelo para determinação de espessuras de barreiras protetoras em salas para radiologia diagnóstica.** Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear-Aplicações). Instituto de Pesquisas Técnicas e Nucleares, São Paulo, 143 p., 1999.

DEMIR, F.; BUDAK, G.; SAHIN, R.; KARABULUT, A.; OLTULU, M.; UN, A. **Determination of radiation attenuation coefficients of heavyweight- and normal-weight concretes containing colemanite and barite for 0.663 mev  $\gamma$ -rays.** Annals of Nuclear Energy 38, Issue 6, p. 1274–1278, 2011.

EMMA - Elkem Materials Mixture Analyzer. **EMMA AS 2012 - Particle packing program.** Disponível em: <<http://www.elkem.com/en/Silicon-materials/Support/Software-EMMA/>>. Acesso em: 22 ago. 2014.

EQUIPE ESTATCAMP. **Software Action. Estatcamp- Consultoria em estatística e qualidade, São Carlos - SP, Brasil.** Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/>>. Acesso em: 15 ago. 2015.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos.** Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 239p, 2002.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para construção civil. In: ISAIA, G. C. et al. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. v. 1. cap. 16, p. 481-523.

FERNANDES, J. S. **Caracterização microestrutural do espaço poroso de rochas reservatório da bacia do rio Tibagi por microtomografia de raios X.** Tese (Doutorado em Física). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 208 p., 2009.

FIRMINO, S. F. **Transmissão e fluência de fótons na área de radiodiagnóstico para diferentes configurações de feixes e blindagens.** Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 98 p., 2010.

FONTANA, L. M. T.; TORALLES-CARBONARI, B. M.; MAZÃO, F. P.; PIEDADE, G. H. **Escória de aciaria de forno elétrico como agregado para concreto**. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto, Gramado, RS. 2013.

FRIMAIO, A. **Desenvolvimento de um material cerâmico para utilização em proteção radiológica diagnóstica**. Dissertação (Mestrado Ciência na Área de Tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 91p., 2006.

GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K.; GROSO, A.; STAMPANONI, M.; MARGARITONDO, G. **3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography ( $\mu$ CT)**. Cement and Concrete Research 37, p. 360–368, 2007.

GENCEL, O.; BOZKURT, A.; KAM, E.; KORKURT, T. **Determination and calculation of gamma and neutron shielding characteristics of concretes containing diferente hematite proportions**. Annals of Nuclear Energy 38, p. 2719-2723, 2011.

GENCEL, O.; KOKSAL, F.; OZEL, C.; BROSTOW, W. **Combined effect fly ash and waste ferrochromium on properties of concrete**. Construction and Building Materials 29, p. 633-640, 2012.

GONZÁLEZ-ORTEGA, M. A.; SEGURA, I.; CAVALARO, S. H. P.; TORALLES-CARBONARI, B.; AGUADO, A.; ANDRELLO, A. C. **Radiological protection and mechanical properties of concretes with EAF steel slags**. Construction and Building Materials 51, p. 432–438, 2014.

GRUPO GRX. **Argamassa Baritada Prot. Radiológica (Barita) 25 kg** Disponível em: < <http://www.grxdistribuidora.com.br/MaisProduto.asp?Produto=665>> Acesso em: 02 jul. 2014a.

GRUPO GRX. **Barita pura moída 25 kg** Disponível em: < <http://www.grx.com.br/MaisProduto.asp?Produto=479>> Acesso em: 02 jul. 2014b.

HIPERMIDIA. **Técnico em radiologia**. Disponível em: < <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/principios-fisicosrx/atenuacao-de-raios-x>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

IABR - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatística**. Disponível em: < <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp?par=201312>>. Acesso em: 22 mai. 2014.

IABR - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2013**. Disponível em: < [http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio\\_sustentabilidade\\_2013v3.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio_sustentabilidade_2013v3.pdf)>. Acesso em: 22 dez. 2013.

IABR - INSTITUTO AÇO BRASIL. **A indústria do aço no Brasil 2012**. Disponível em: <

[http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/livro\\_cni.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/livro_cni.pdf)>. Acesso em: 22 dez. 2013.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Manual on Gamma Radiography**. Viena, 1996. Disponível em: <<https://gnssn.iaea.org/CSN/TM%2048337%20Industrial%20Radiography/Reference%20Material/IAEA%20Practical%20Radiation%20Safety%20Manual%20on%20Gamma%20Radiography.pdf>>. Acesso em: 07 mai. 2015.

IBS - INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS. **Index**. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br/index.swf>>. Acesso em: 04 dez. 2013.

JAMKAR, S. S.; RAO, C. B. K. **Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning**. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 11, p. 2021- 2027, 2004.

JEENU, G.; VINOD, P.; MANGAL, L. **Packing characteristics of aggregates for high performance concrete**. International Journal of Earth Sciences and Engineering, v. 5, n. 5, p. 1424-1431, 2012.

KRAEMER, M. E. P. **Responsabilidade social: um olhar para a sustentabilidade**. Online. Disponível em:<<http://www.gestiopolis.com/responsabilidade-social-um-olhar-para-a-sustentabilidade/>>. Acesso em: 09 fev. 2013, v. 23, 2005.

KWAN, A.K.H.; FUNG, W.W.S. **Packing density measurement and modeling of fine aggregate and mortar**. Cement and Concrete Composites, v. 31, n.6, p. 349-357, 2009.

KWAN, A.K.H.; MORA, C.F. **Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles**. Magazine of Concrete Research, v. 53, n.2, p. 91-100, 2001.

LANGE, F.; MÖRTEL, H.; RUDERT, V. **Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties**. Cement and Concrete Research 27, n. 10, p. 1481-1488, 1997.

LIMA, I.; APPOLONI, C.; OLIVEIRA, L.. LOPES, R. T. **Caracterização de materiais cerâmicos através da Microtomografia computadorizada 3D**. Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação, v. 1, n. 2, p. 22-27, 2007.

LING, T. C.; POON, C. S.; LAM, W. S.; CHAN, T. P.; FUNG, K. K. L. **X-ray radiation shielding properties of cement mortars prepared with different types of aggregates**. Materials and Structures 46, p.1133–1141, 2013.

LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. (Ed.). **Rochas e Minerais Industriais: Uso e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. 867 p. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/livros/Livro Rochas e Min. Ind. 1a.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2014.

MANSO, J. M.; GONZALEZ, J. J.; POLANCO, J. A. **Electric arc furnace slag in concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering 16, p. :639-645, 2004.

MASLEHUDDIN, M.; NAQVI, A. A.; IBRAHIM, M.; KALAKADA, Z. **Radiation shielding properties of concrete with electric arc furnace slag aggregates and steel shots**. Annals of Nuclear Energy 53, p. 192-196, 2013.

MASLEHUDDIN, M.; SHARIF, A. M.; SHAMEEM, M.; IBRAHIM, M.; BARRY, M.S. **Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes**. Construction and Building Materials 17, p. 105-112, 2003.

MATTANA, A. Jr.; COSTA, M. R. M. M. **Avaliação da estrutura interna por microtomografia em pastas cimentícias**. In: IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Belo Horizonte, MG, 2011.

MAURÍCIO, A.; PEREIRA, M.; FLORES-COLEN, I.; SILVA, L.; FONTES, A. **Microtomografia computadorizada de raios X aplicada ao estudo de argamassas**. In: 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS. APFAC: Coimbra, Portugal, 2012.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOSTOFINEJAD, D.; REISI, M. **A new DEM-based method to predict packing density of coarse aggregates considering their grading and shapes**. Construction and Building Materials 35, p. 414-420, 2012.

MOSTOFINEJAD, D.; REISI, M.; SHIRANI, A. **Mix design effective parameters on  $\gamma$ -ray attenuation coeficiente and strength of normal and heavyweight concrete**. Construction and Building Materials 28, 224-229, 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2 ed., São Paulo: PINI, 1997

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 141 p., 2013.

OLIVEIRA, R.; SANTOS, D.; FERREIRA, D.; COELHO, P.; VEIGA, F. **Preparações radiofarmacêuticas e suas aplicações**. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas (Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences) vol. 42, n. 2, abr./jun., 2006.

ORTEGA, F. S.; PILEGGI, R. G.; SEPÚLVEDA, P.; PANDOLFELLI, V. C. **Influência dos modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade verde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem**. Cerâmica 43, p. 183-189, 1997.

PELLEGRINO, C.; CAVAGNIS, P.; FALESCHINI, F.; BRUNELLI, K. **Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate**. Cement & Concrete Composites 37, p. 232–240, 2013.

PESSÔA, J. R. C. **Microtomografia com Raio X e processamento de imagem na obtenção da porosidade do concreto.** Tese (Doutorado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 129 p., 2011.

PESSÔA, J. R. C.; DOMINGUÉZ, J. D.; CARVALHO, G.; ASSIS, J. T. **Porosidade do Concreto Determinada por Microtomografia com Raio X e Processamento de Imagem.** Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE, v. 14 - n. 2 - p. 20-26, 2014.

PIRES, L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de água pelo solo.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 217 p., 2006.

POLISSENI, A. E. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício.** 2005. 251 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ÂNGULO, S. C.; GUILGE, M. S.; CAVANI, G. R.; CASTRO, A. L.; CINCOTTO, M. A. **Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 175-187, out.-dez. 2009.

RATTANASAK, U.; KENDALL, K. **Pore structure of cement/pozzolan composites by X-ray microtomography.** Cement and Concrete Research 35, p. 637 – 640, 2005.

SHIRMARDI, S.P.; SHAMSAEI, M.; NASERPOUR, M. **Comparison of photon attenuation coefficients of various barite concretes and lead by mcnp code, xcom and experimental data.** Annals of Nuclear Energy 55, p. 288-291, 2013.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. **Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina.** Cerâmica 50, p. 345-354, 2004.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 21-35, out./dez. 2008. ISSN 1678-8621

TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; PRINZIO, R. Di.; PRINZIO, M. A. R. R. Di. **Radioproteção e dosimetria: Fundamentos.** Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 5ª rev, 242 p., 2003.

TOPÇU, I. B. **Properties of heavyweight concrete produced with barite.** Cement and Concrete Research 33, p. 815-822, 2003.

TRISTÃO, F. A. **A influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento.** Dissertação (Mestrado)

Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 197 p, 1995.

TRISTÃO, F. A.; ROMAN, H. R. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades mecânicas das argamassas**. In: I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Goiânia, GO, p. 283-294, 1995.

TÜRKMEN, I.; ÖZDEMİR, Y.; KURUDIREK, M.; DEMİR, F.; SIMSEK, Ö. DEMIRBOĞA, R. **Calculation of radiation attenuation coefficients in Portland cements mixed with silica fume, blast furnace slag and natural zeolite**. Annals of Nuclear Energy 35, p. 1937–1943, 2008.

WAN, K. S.; XU, Q. **Local porosity distribution of cement paste characterized by X-ray micro-tomography**. Sci China Tech Sci 57, p. 953-961, 2014, doi: 10.1007/s11431-014-5513-5

WSA - WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel production 2013**. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/2013-steel-production.html>>. Acesso em: 22 mai. 2014.

YILMAZ, E.; BALTAS, H.; KIRIS, E.; USTABAS, I.; CEVIK, U.; EL-KHAYATT, A. M. **Gamma ray and neutron shielding properties of some concrete materials**. Annals of Nuclear Energy, 38, p. 2204–2212, 2011.

## ANEXO A

### 1 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

#### 1.1 Massa Específica no Estado Fresco

Argamassa de referência (ArgRef)	
Amostra	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Média	2,19
Desvio padrão	0,03
CV (%)	1,31

Argamassa de escória (ArgEA)	
Amostra	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Média	2,67
Desvio padrão	0,03
CV (%)	0,99

Argamassa de escória com barita (ArgEA+B)	
Amostra	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Média	2,83
Desvio padrão	0,02
CV (%)	0,72

## ANOVA

<i>Tabela da Anova</i>					
	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
Fator	2	1,138413333	0,569206667	674,9486166	4,67974E-13
Resíduos	12	0,01012	0,000843333		

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite.Inferior</i>	<i>Limite.Superior</i>	<i>P-valor</i>
ArgEAB-ArgEA	0,168	0,119000318	0,216999682	2,59247E-06
ArgRef-ArgEA	-0,482	-0,53099968	-0,433000318	9,15368E-12
ArgRef-ArgEAB	-0,65	-0,69899968	-0,601000318	6,05738E-13

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
ArgEAB	2,836	a
ArgEA	2,668	b
ArgRef	2,186	c

## Teste HSU

<i>Nível</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>
ArgEA	-0,168	-0,207	0
ArgEAB	0,168	0	0,207
ArgRef	-0,65	-0,689	0

## 1.2 Resistência à Compressão

<b>Argamassa de referência (ArgRef)</b>		
<b>Amostra</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>
<b>Média fc (MPa)</b>	<b>5,52</b>	<b>7,46</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,53</b>	<b>0,36</b>
<b>CV (%)</b>	<b>9,54</b>	<b>4,84</b>

<b>Argamassa de escória (ArgEA)</b>		
<b>Amostra</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>
<b>Média fc (MPa)</b>	<b>34,74</b>	<b>51,62</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>3,63</b>	<b>1,91</b>
<b>CV (%)</b>	<b>10,46</b>	<b>3,70</b>

<b>Argamassa de escória com barita (ArgEA+B)</b>		
<b>Amostra</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>
<b>Média fc (MPa)</b>	<b>27,23</b>	<b>46,69</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>3,98</b>	<b>4,51</b>
<b>CV (%)</b>	<b>14,61</b>	<b>9,66</b>

## ANOVA – Resistência à compressão aos 7 dias

<i>Tabela da Anova</i>					
	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
Fator	2	2302,74372	1151,37186	108,9659709	2,02065E-08
Resíduos	12	126,79612	10,56634333		

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite.Inferior</i>	<i>Limite.Superior</i>	<i>P-valor</i>
ArgEAB-ArgEA	-7,506	-12,99073924	-2,02126076	0,00861874
ArgRef-ArgEA	-29,22	-34,70473924	-23,73526076	1,99322E-08
ArgRef-ArgEAB	-21,714	-27,19873924	-16,22926076	5,53298E-07

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
ArgEA	34,74	a
ArgEAB	27,234	b
ArgRef	5,52	c

## Teste HSU

<i>Nível</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>
ArgEA	7,506	0	11,84
ArgEAB	-7,506	-11,84	0
ArgRef	-29,22	-33,554	0

## ANOVA – Resistência à compressão aos 28 dias

<i>Tabela da Anova</i>					
	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
Fator	2	5855,215053	2927,607527	377,3422752	1,47024E-11
Resíduos	12	93,10192	7,758493333		

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite.Inferior</i>	<i>Limite.Superior</i>	<i>P-valor</i>
ArgEAB-ArgEA	-4,934	-9,633831864	-0,234168136	0,039537572
ArgRef-ArgEA	-44,16	-48,85983186	-39,46016814	1,84107E-11
ArgRef-ArgEAB	-39,226	-43,92583186	-34,52616814	1,08479E-10

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
ArgEA	51,62	a
ArgEAB	46,686	b
ArgRef	7,46	c

## Teste HSU

<i>Nível</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>
ArgEA	4,934	0	8,648
ArgEAB	-4,934	-8,648	0
ArgRef	-44,16	-47,874	0

## 1.3 Resistência à Tração

Argamassa de referência (ArgRef)	
Amostra	28 dias
Média ft (MPa)	1,14
Desvio padrão	0,18
CV (%)	15,86

Argamassa de escória (ArgEA)	
Amostra	28 dias
Média ft (MPa)	4,27
Desvio padrão	0,73
CV (%)	17,13

Argamassa de escória com barita (ArgEA+B)	
Amostra	28 dias
Média ft (MPa)	3,62
Desvio padrão	0,44
CV (%)	12,16

## ANOVA – Resistência à tração

## Teste de Tukey

Tabela da Anova					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	2	27,40757333	13,70378667	53,949792	1,00504E-06
Resíduos	12	3,04812	0,25401		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
ArgEAB-ArgEA	-0,648	-1,49839174	0,20239174	0,146636612
ArgRef-ArgEA	-3,136	-3,98639174	-2,28560826	1,19255E-06
ArgRef-ArgEAB	-2,488	-3,33839174	-1,63760826	1,34E-05

Fator	Médias	Grupos
ArgEA	4,272	a
ArgEAB	3,624	a
ArgRef	1,136	b

**Teste HSU**

<i>Nível</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>
ArgEA	0,648	-0,024	1,32
ArgEAB	-0,648	-1,32	0,024
ArgRef	-3,136	-3,808	0

## 1.4 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Argamassa de referência (ArgRef)					
CP	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade de propagação (m/s)	Módulo de elasticidade (GPa)		
			Ultrassom	NBR 6118/2007	CEB/FIP 2010
Média	2,06	2402	10,70	11,42	19,50
Desvio padrão	0,06	38,69	0,11	-	-
CV (%)	3,05	1,61	1,02	-	-

Argamassa de escória (ArgEA)					
CP	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade de propagação (m/s)	Módulo de elasticidade (GPa)		
			Ultrassom	NBR 6118/2007	CEB/FIP 2010
Média	2,59	4016,20	31,33	38,82	37,10
Desvio padrão	0,06	25,62	0,48	-	-
CV (%)	2,15	0,64	1,53	-	-

Argamassa de escória com escória (ArgEA+B)					
CP	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade de propagação (m/s)	Módulo de elasticidade (GPa)		
			Ultrassom	NBR 6118/2007	CEB/FIP 2010
Média	2,67	3859,80	35,85	36,89	35,93
Desvio padrão	0,03	33,55	0,62	-	-
CV (%)	0,99	0,87	1,74	-	-

## ANOVA – Massa específica no estado endurecido

## Teste de Tukey

<i>Tabela da Anova</i>					
	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
Fator	2	1,083853333	0,541926667	193,3151011	7,4416E-10
Resíduos	12	0,03364	0,002803333		

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite.Inferior</i>	<i>Limite.Superior</i>	<i>P-valor</i>
ArgEAB-ArgEA	0,08	-0,009336924	0,169336924	0,081116956
ArgRef-ArgEA	-0,526	-0,615336924	-0,436663076	6,44544E-09
ArgRef-ArgEAB	-0,606	-0,695336924	-0,516663076	1,36982E-09

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
ArgEAB	2,668	a
ArgEA	2,588	a
ArgRef	2,062	b

## Teste HSU

<i>Nível</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>
ArgEA	-0,08	-0,151	0
ArgEAB	0,08	0	0,151
ArgRef	-0,606	-0,677	0

## ANOVA – Módulo de elasticidade dinâmico

## Teste de Tukey

<i>Tabela da Anova</i>					
	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
Fator	2	2264,440093	1132,220047	4318,154259	7,13675E-18
Resíduos	12	3,1464	0,2622		

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite.Inferior</i>	<i>Limite.Superior</i>	<i>P-valor</i>
ArgEAB-ArgEA	-1,748	-2,611992494	-0,884007506	0,000436309
ArgRef-ArgEA	-26,894	-27,75799249	-26,03000751	2,70894E-14
ArgRef-ArgEAB	-25,146	-26,00999249	-24,28200751	2,70894E-14

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
ArgEA	37,598	a
ArgEAB	35,85	b
ArgRef	10,704	c

### Teste HSU

<i>Nível</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>
ArgEA	1,748	0	2,431
ArgEAB	-1,748	-2,431	0
ArgRef	-26,894	-27,577	0

## 1.5 Absorção de Água

<b>Argamassa de referência (ArgRef)</b>			
<b>CP</b>	<b>Absorção aos 28 dias (%)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>
<b>Média</b>	<b>17,4</b>	<b>2,15</b>	<b>33,3</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
<b>CV (%)</b>	<b>3,71</b>	<b>0,84</b>	<b>3,49</b>

<b>Argamassa de escória (ArgEA)</b>			
<b>CP</b>	<b>Absorção aos 28 dias (%)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>
<b>Média</b>	<b>8,1</b>	<b>2,55</b>	<b>19,2</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
<b>CV (%)</b>	<b>8,23</b>	<b>0,96</b>	<b>7,24</b>

<b>Argamassa de escória e barita (ArgEA+B)</b>			
<b>CP</b>	<b>Absorção aos 28 dias (%)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>
<b>Média</b>	<b>7,84</b>	<b>2,68</b>	<b>19,67</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,002</b>	<b>0,010</b>	<b>0,004</b>
<b>CV (%)</b>	<b>2,35</b>	<b>0,37</b>	<b>2,03</b>

## ANOVA - Para o ensaio de absorção de água

## Teste de Tukey

Tabela da Anova					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	2	299,5808533	149,7904267	454,7233741	4,87827E-12
Resíduos	12	3,95292	0,32941		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
ArgEAB-ArgEA	-0,236	-1,204416132	0,732416132	0,795799055
ArgRef-ArgEA	9,36	8,391583868	10,32841613	1,1924E-11
ArgRef-ArgEAB	9,596	8,627583868	10,56441613	8,22009E-12

Fator	Médias	Grupos
ArgRef	17,44	a
ArgEA	8,08	b
ArgEAB	7,844	b

## Teste HSU

Nível	Média	LI	LS
ArgEA	-9,36	-10,125	0
ArgEAB	-9,596	-10,361	0
ArgRef	9,36	0	10,125

## ANOVA - Para ensaio de massa específica

## Teste de Tukey

Tabela da Anova					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	2	0,766653333	0,383326667	833,3188406	1,33458E-13
Resíduos	12	0,00552	0,00046		

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite.Inferior</i>	<i>Limite.Superior</i>	<i>P-valor</i>
ArgEAB-ArgEA	0,126	0,089811337	0,162188663	2,20269E-06
ArgRef-ArgEA	-0,404	-0,440188663	-0,367811337	2,02371E-12
ArgRef-ArgEAB	-0,53	-0,566188663	-0,493811337	2,91656E-13

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
ArgEAB	2,68	a
ArgEA	2,554	b
ArgRef	2,15	c

**Teste HSU**

<i>Nível</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>
ArgEA	-0,126	-0,155	0
ArgEAB	0,126	0	0,155
ArgRef	-0,53	-0,559	0

**ANOVA - Para o ensaio de índice de vazios****Teste de Tukey**

<b>Tabela da Anova</b>					
	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
Fator	2	643,99492	321,99746	225,526321	3,02904E-10
Resíduos	12	17,13312	1,42776		

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite.Inferior</i>	<i>Limite.Superior</i>	<i>P-valor</i>
ArgEAB-ArgEA	0,494	-1,52214253	2,51014253	0,793858314
ArgRef-ArgEA	14,14	12,12385747	16,15614253	9,4661E-10
ArgRef-ArgEAB	13,646	11,62985747	15,66214253	1,40335E-09

Fator	Médias	Grupos
ArgRef	33,32	a
ArgEAB	19,674	b
ArgEA	19,18	b

#### Teste HSU

Nível	Média	LI	LS
ArgEA	-14,14	-15,733	0
ArgEAB	-13,646	-15,239	0
ArgRef	13,646	0	15,239

## 1.6 Absorção de Água por Capilaridade

<b>Argamassa de referência (ArgRef)</b>					
<b>Absorção de água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)</b>					
<b>CP</b>	<b>3 horas</b>	<b>6 horas</b>	<b>24 horas</b>	<b>48 horas</b>	<b>72 horas</b>
<b>Média</b>	<b>2,00</b>	<b>2,55</b>	<b>2,71</b>	<b>2,75</b>	<b>2,79</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,08</b>	<b>0,06</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	<b>0,05</b>
<b>CV (%)</b>	<b>4,08</b>	<b>2,53</b>	<b>1,84</b>	<b>2,34</b>	<b>1,79</b>

<b>Argamassa de escória (ArgEA)</b>					
<b>Absorção de água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)</b>					
<b>CP</b>	<b>3 horas</b>	<b>6 horas</b>	<b>24 horas</b>	<b>48 horas</b>	<b>72 horas</b>
<b>Média</b>	<b>0,31</b>	<b>0,39</b>	<b>0,69</b>	<b>0,90</b>	<b>1,06</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,00</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>
<b>CV (%)</b>	<b>0,00</b>	<b>10,53</b>	<b>5,88</b>	<b>4,55</b>	<b>4,71</b>

<b>Argamassa de escória e barita (ArgEA+B)</b>					
<b>Absorção de água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)</b>					
<b>CP</b>	<b>3 horas</b>	<b>6 horas</b>	<b>24 horas</b>	<b>48 horas</b>	<b>72 horas</b>
<b>Média</b>	<b>0,29</b>	<b>0,37</b>	<b>0,71</b>	<b>0,86</b>	<b>0,96</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,08</b>	<b>0,05</b>	<b>0,09</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>
<b>CV (%)</b>	<b>26,73</b>	<b>13,61</b>	<b>12,78</b>	<b>12,14</b>	<b>10,85</b>

## 1.7 Atenuação de Radiação

<b>Argamassa de referência (ArgRef)</b>	
<b>Amostra</b>	<b>Atenuação de radiação (cm<sup>-1</sup>)</b>
<b>Média (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>0,1438</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,00</b>
<b>CV (%)</b>	<b>2,58</b>

<b>Argamassa de escória (ArgEA)</b>	
<b>Amostra</b>	<b>Atenuação de radiação (cm<sup>-1</sup>)</b>
<b>Média (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>0,1584</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,01</b>
<b>CV (%)</b>	<b>8,40</b>

<b>Argamassa de escória com barita (ArgEA+B)</b>	
<b>Amostra</b>	<b>Atenuação de radiação (cm<sup>-1</sup>)</b>
<b>Média (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>0,1875</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,00</b>
<b>CV (%)</b>	<b>0,52</b>

## ANOVA – Atenuação de Radiação

## Teste de Tukey

<i>Tabela da Anova</i>					
	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
Fator	2	0,004956249	0	38,68845754	5,85781E-06
Resíduos	12	0,00076864	0		

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite.Inferior</i>	<i>Limite.Superior</i>	<i>P-valor</i>
ArgEAB-ArgEA	0,02908	0,015575936	0,04	0,000251867
ArgRef-ArgEA	-0,01466	-0,02816406	-0	0,033366285
ArgRef-ArgEAB	-0,04374	-0,05724406	-0	4,7101E-06

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
ArgEAB	0,1875	A
ArgEA	0,15842	B
ArgRef	0,14376	C

## Teste HSU

<i>Nível</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>
ArgEA	-0,029	-0,04	0
ArgEAB	0,029	0	0,04
ArgRef	-0,044	-0,054	0

## 1.8 Parte 2 – Seleção da pasta cimentícia

Relação a/c	Composição da argamassa	Coefficiente de atenuação $\mu$ (cm <sup>-1</sup> )
0,40	ArgAE + 40% B	0,1635
	ArgAE + 60% B	0,1604
	ArgAE + 80% B	0,1599
0,45	ArgAE + 40% B	0,1565
	ArgAE + 60% B	0,1626
	ArgAE + 80% B	0,1703

## ANOVA

## Teste de Tukey

Níveis	a/c 0,45 – ArgEA+60% B	a/c 0,45 – ArgEA+80% B	a/c 0,45 – ArgEA+40% B	a/c 0,40 – ArgEA+80% B	a/c 0,40 – ArgEA+60% B	a/c 0,40 – ArgEA+40% B
a/c 0,45 – ArgEA+60% B		0,048671	0,195567	0,904930	0,954907	0,999275
a/c 0,45 – ArgEA+80% B	0,048671		0,000174	0,002845	0,004740	0,110777
a/c 0,45 – ArgEA+40% B	0,195567	0,000174		0,774569	0,671102	0,093550
a/c 0,40 – ArgEA+80% B	0,904930	0,002845	0,774569		0,999978	0,735308
a/c 0,40 – ArgEA+60% B	0,954907	0,004740	0,671102	0,999978		0,829708
a/c 0,40 – ArgEA+40% B	0,999275	0,1100777	0,093550	0,735308	0,829708	

Fator	Médias	Grupos
a/c 0,40 – ArgEA+40% B	0,1635	ab
a/c 0,40 – ArgEA+60% B	0,1604	a
a/c 0,40 – ArgEA+80% B	0,1599	a
a/c 0,45 – ArgEA+40% B	0,1565	a
a/c 0,45 – ArgEA+60% B	0,1626	a
a/c 0,45 – ArgEA+80% B	0,1703	b