

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**Tese de Doutorado**

**COMPORTAMENTO DE MISTURAS TERNÁRIAS  
CONSTITUÍDAS DE CIMENTO PORTLAND,  
ARDÓSIA E ESCÓRIA DE ALTO FORNO  
FINAMENTE MOÍDAS E SEM O USO DE  
ADITIVOS DISPERSANTES**

**ESCOLA DE MINAS / UFOP**

**AUTOR: EVANDRO CARRUSCA DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Romero César Gomes**

**COORIENTADOR: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes**

**OURO PRETO**

**Junho, 2017**

O482c

Oliveira, Evandro Carrusca.

Comportamento de misturas ternárias constituídas de cimento Portland, ardósia e escória de alto forno finamente moídas e sem o uso de aditivos dispersantes [manuscrito] / Evandro Carrusca Oliveira. - 2017.  
xxii, 180f.: il.: color; grafs; tabs; figuras.

Orientador: Prof. Dr. Romero César Gomes.

Coorientador: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.  
Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.  
Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

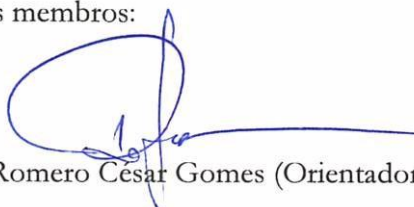
1. Argamassa. 2. Cimento - Mistura. 3. Ardósia - Resíduos. 4. Escória - Alto-forno.  
5. Ardósia - Industrialização. I. Gomes, Romero César. II. Gomes, Abdias Magalhães.  
III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.13

# COMPORTAMENTO DE MISTURAS TERNÁRIAS CONSTITUÍDAS DE CIMENTO PORTLAND, ARDÓSIA E ESCÓRIA DE ALTO FORNO FINAMENTE MOÍDAS E SEM O USO DE ADITIVOS DISPERSANTES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Doutor em Geotecnia**.

Esta tese foi apresentada em sessão pública e aprovada em 26 de Junho de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Romero César Gomes (Orientador – UFOP)



Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes (Coorientador - UFMG)



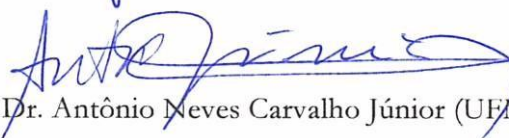
Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva (UFOP)



Prof.ª. Dr.ª. Augusto César da Silva Bezerra (CEFET-MG/UFOP)



Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva (CEFET-MG)



Prof. Dr. Antônio Neves Carvalho Júnior (UFMG)

*A sabedoria não se transmite, é preciso que a gente mesma a descubra  
depois de uma caminhada que ninguém pode fazer em nosso lugar ...  
porque a sabedoria é uma maneira própria de se ver as coisas.*

*Marcel Proust (1871 - 1922)*

*A essência do meu envolvimento com a pesquisa de minerais industriais  
é transformar uma terra podre em um bem mineral.*

*Evandro Carrusca de Oliveira, 1990*

*[...] é oportuno acentuar que a tecnologia, em que pesem as opiniões  
discordantes, não é estática e sim varia continuamente com o tempo,  
devendo ser adaptada à conjuntura regional existente no país em que é  
utilizada.*

*Pérsio de Souza Santos, 1992*

*Maria Célia, Felipe, Fabiano, Fernanda e Reginaldo,  
meu alicerce...*

*Nos meus momentos, vocês incentivaram-me ...  
encorajaram-me ...  
impulsionaram-me ...*

*Nos seus momentos, abdicaram-se ...*

*Minha eterna gratidão.*

## AGRADECIMENTOS

Como ranquear a importância de um agradecimento ao término de uma obra que formalizou um hiato em meu cotidiano ao longo destes últimos anos da minha vida profissional? Impossível!!! Pois, por todos aqui lembrados e por aqueles que a memória adormeceu neste instante imediato, fui agraciado com degraus que me possibilitaram atingir o cume desta realização. Portanto, agradeço a todos, indistintamente a todos, que me ajudaram a transmutar este sonho até esta realidade. Seria impossível realizar esta transmutação se não existisse esta somatória de forças, conhecimentos, despojamentos, incentivos, renúncias, sonhos ...

Neste universo tão amplo, cito alguns, os quais sinto estarem representando todos os partícipes desta caminhada neste singelo agradecimento:

- à Professora Maria José Salum, que em outubro de 2011, no 8º Seminário Nacional de APLS de Base Mineral realizado em Campina Grande–PB, cobrou-me a continuidade do meu mestrado através do doutorado. Naquela oportunidade, orientou-me procurar o professor “Romerinho” na UFOP, iniciando o lapidar deste sonho...
- ao Professor Romero César Gomes (UFOP), por ter ouvido a minha proposta, acreditado e me abrigado nesta caminhada, nesta conquista...
- ao Professor Abdias Magalhães Gomes (UFMG) que, num momento de portas fechadas na indústria do cimento, acolheu-me, ofertando-me todo o seu saber no campo da ciência dos materiais cimentícios para o êxito desta realização. Registro esta nossa jornada com o seguinte pensamento: “sonhamos juntos..., construímos juntos..., realizamos juntos...”
- aos companheiros do Centro de Produção Sustentável da UFMG, da planta de Pedro Leopoldo, Cleber F. Eustáquio, Daniela P. Santana, Cleisson F. Eustáquio e Dener Gonçalves, por compartilhar comigo os seus conhecimentos e experiências no desenvolvimento dos experimentos propostos...

- aos irmãos Romero e Ronaldo Valadares, empresários dos segmentos de extração e beneficiamento de ardósia em Papagaios-MG, pelo apoio logístico, pela doação de brita de ardósia para os experimentos e por continuarem a acreditar nesta parceria Empresa - Universidade – Centros de Pesquisa na busca do desenvolvimento do setor de ardósia em Minas Gerais...
- à Fernanda Wasner, amiga, irmã, incentivadora, colega, professora, revisora, parceira em todos os momentos desta caminhada, ao lado da sua mãe Dona Margarida ...
- aos Professores Mateus Justino (CEFET-MG), Antônio Neves Junior (UFMG), Augusto Bezerra (CEFET-MG), Guilherme Brigolini (UFOP) e Ayrton Vianna (UFMG) pelo apoio e contribuição para o desenvolvimento do tema estudado...
- ao Professor Sidney Nicodemos (CEFET-MG) pela sua generosidade ao acolher-me nesta busca pelo entendimento dos resultados obtidos, compartilhando comigo esse seu amor e vibração pela ciência dos materiais ...
- à Cristina Esteves, pela competência e disposição em operar e interpretar todo o sistema envolvendo a microscopia eletrônica de varredura, fluorescência, difratometria, BET e outros ensaios que se tornaram o alicerce dos meus resultados...
- aos Professores e colegas do NUGEO/UFOP, em especial a amiga Sylvia Furtado, com quem compartilhei grandes jornadas em bibliotecas da UFOP e UFMG buscando resolver as intermináveis listas de exercícios e preparação para as provas...
- à minha mãe querida, Marta Carrusca, meu exemplo de vida, minha eterna professora, cuja coragem, doação, carinho com sonhadoras crianças de uma escola rural me inspiram ainda hoje ao trilhar a minha estrada evolutiva...

- aos Srs. Antônio e William e a Sra. Lucila, meu pai e meus sogros, a quem agradeço pelo apoio e por terem tolerado a minha ausência durante a concretização desta missão...
- aos meus amores, Maria Célia, Felipe, Fabiano, Fernanda e Reginaldo, para quem tentei ser, com a busca desta conquista, um exemplo para o futuro de seus saberes...

Muito obrigado!



## RESUMO

Localiza-se no estado de Minas Gerais o maior polo produtor e beneficiador nacional da rocha ardósia para uso na indústria da construção civil, sendo o município de Papagaios o responsável pelo maior volume de produção. A ardósia é uma rocha cuja principal aplicação é na construção civil como rocha de revestimento, na forma de placas para revestimento, bancadas, móveis, artesanatos, dentre outros. Este segmento produtivo é responsável por significativos impactos ambientais em toda a cadeia de extração e beneficiamento, com destaque nas lavras, onde o aproveitamento desta rocha pela indústria registram percentuais médios em torno de 10%. Aproximadamente 90% do restante ali extraído é descartado como rejeito na forma de matacões, cacos, aparas, lama e pó, não conformes com a legislação ambiental em vigor. Este trabalho apoiou-se na análise e avaliação do comportamento de uma mistura ternária composta de cimento Portland, ardósia e escória de alto forno finamente moídas, sem o uso de aditivos dispersantes, e tendo como referência a resistência à compressão normatizada pela NBR 7215/1996. Amostras com dosagens priorizando a substituição de 40% de cimento da mistura pela adição de ardósia e escória de alto forno finamente moídas, registraram índices de resistência à compressão muito próximos dos índices da amostra Padrão, que atingiu valor médio de 55,90 MPa. Destacam-se os resultados de duas amostras com índices de resistência à compressão média de 50,10 MPa e 48,11 MPa, equivalentes a 89,6% e 86,1%, respectivamente, da amostra Padrão. Concluiu-se que a fase inicial de testes de laboratório apresentou resultados positivos, confirmando a possibilidade de se empregar os resíduos finos de ardósia e escória de alto forno como adição mineral na mistura ternária em substituição parcial do cimento Portland. A pesquisa sinaliza, também, que o elevado índice de partículas finas formando aglomerados impede o completo preenchimento dos poros vazios das amostras da mistura ternária, justificando a maior porosidade e, conseqüentemente, a perda de resistência à compressão. Para minimizar este efeito, sugere-se novos ensaios empregando aditivos dispersantes, possibilitando o preenchimento dos poros pelas partículas finas desaglomeradas, tornando o corpo cerâmico mais compacto e, assim, mais resistente à compressão.

Palavras-chave: mistura ternária, cimento Portland, resíduos de ardósia, escória de alto forno, aproveitamento industrial.

## ABSTRACT

It is located in the state of Minas Gerais the largest producer and national processor of the slate rock for uses in the construction industry, and the municipality of Papagaios is responsible for the largest volume of production. Slate is a kind of rock whose main application is in the construction as in coating rock, in the shape of boards for coating, countertops, furniture, handicrafts, among others. This productive segment is responsible for significant environmental impacts throughout the chain of extraction and processing, with emphasis on mining, where the use of this rock by the industry recorded average percentages around 10%. Approximately 90% of the remainder is discarded as waste in the form of boulders, fragments, chips, mud and dust, which do not comply with the environmental legislation in force. In this work was based on the analysis and evaluation of the behavior of a ternary mixture composed of finely ground Portland cement, slate and blast furnace slag, without the use of dispersing additives, and having as reference the standardized compression strength by NBR 7215/1996. Samples with dosages prioritizing the substitution of 40% of cement of the mixture by the addition of finely ground slate and blast furnace slag recorded compression strength indices very close to the Standard sample rates, which reached an average value of 55.90 MPa. It was highlighted the results of two samples with average compressive strength indexes of 50.10 MPa and 48.11 MPa, equivalent to 89,6% and 86.1%, respectively, of the Standard sample. It was concluded that the initial phase of laboratory tests presented positive results, confirming the possibility of using slate final residues and blast furnace slag as a mineral addition in the ternary mixture in partial replacement of the Portland cement. The research also indicates that the high index of fine particles forming agglomerates prevents the complete filling of the empty pores of the samples of the ternary mixture, justifying the higher porosity and, consequently, the loss of compressive strength. To minimize this effect, it is suggested new tests using dispersing additives, allowing the pores to be filled by the deagglomerated fine particles, making the ceramic body more compact and thus more resistant to compression.

Keywords: ternary mix, Portland cement, slate residues, blast furnace slag, industrial use.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Lavras de ardósia a céu aberto. ....	21
<b>Figura 2.2</b> - Esquadrejamento e uso de discos diamantados para corte de pranchões ou lajão.....	22
<b>Figura 2.3</b> - (A) carregamento de pranchões para serrarias e (B) abertura rudimentar de pranchões .....	22
<b>Figura 2.4</b> - Depósitos de rejeitos de lavra nas margens do Rio Paraopeba, formados de cacos e solo residual. ....	23
<b>Figura 2.5</b> - Depósitos de rejeitos de serraria em vias públicas, formados de aparas e lama.....	23
<b>Figura 3.1</b> - Vista externa do Centro de Produção Sustentável da UFMG.....	53
<b>Figura 3.2</b> - Vista parcial do Centro de Produção Sustentável da UFMG.....	53
<b>Figura 3.3</b> – Brita de ardósia usada nos experimentos da pesquisa.....	54
<b>Figura 3.4</b> – Britador de mandíbulas reduzindo a granulometria da brita de ardósia....	54
<b>Figura 3.5</b> – Peneira vibratória separando as frações granulométricas da brita de ardósia.....	55
<b>Figura 3.6</b> – Moinho de bolas utilizado para a cominuição da brita de ardósia. ....	55
<b>Figura 3.7</b> – Corpo moedor constituído de bolas de ferro fundido.....	56
<b>Figura 3.8</b> – Brita fina de ardósia (A) e Ardósia em pó (B) .....	56
<b>Figura 3.9</b> - Areia Normal Brasileira desenvolvida pelo IPT (NBR 7214) .....	58
<b>Figura 3.10</b> - Cimento Portland CP-V usado nos experimentos da pesquisa. ....	58
<b>Figura 3.11</b> –Ardósia moída em moinho pendular (A) e Escória de alto forno moída na Central Ibec (B). ....	59
<b>Figura 3.12</b> – Ardósia processada em moinho pendular em Itu-SP.....	59
<b>Figura 3.13</b> -Balança eletrônica.....	60
<b>Figura 3.14</b> – Argamassadeira elétrica com comando temporizado.....	60
<b>Figura 3.15</b> – Moldes metálicos com dimensões 50 x 100 mm, para elaboração de corpos-de-prova. ....	61
<b>Figura 3.16</b> – Soquete para adensamento da argamassa no molde cilíndrico.....	61
<b>Figura 3.17</b> – Caixa d’água para imersão dos corpos-de-prova em água.....	62
<b>Figura 3.18</b> – Aparelho retificador do corpo de prova. ....	62
<b>Figura 3.19</b> – Prensa elétrica hidráulica para compressão dos CP .....	63

<b>Figura 3.20</b> – Balança eletrônica pesando cada fração da areia normal do IPT/SP. ....	66
<b>Figura 3.21</b> – Etapas relacionadas com a mistura dos componentes da argamassa em estudo.....	67
<b>Figura 3.22</b> – (A) Amassamento da argamassa no molde de corpo-de-prova. (B) Rasadura do topo com espátula. (C) Corpo-de-prova sendo preparado para o repouso de 24 horas antes do desmoldamento. ....	67
<b>Figura 3.23</b> – Corpo-de-prova MB 22 pronto para a desmoldagem após o repouso de 24 horas.....	68
<b>Figura 3.24</b> – Corpos-de-prova desmoldados e preparados para a imersão na água durante 28 dias. ....	68
<b>Figura 3.25</b> – Conjuntos de corpos-de-prova imersos em água.....	69
<b>Figura 3.26</b> – Retificação de corpo-de-prova antes da ruptura.....	69
<b>Figura 3.27</b> – (A) Detalhe do corpo-de-prova MB 23 na prensa. (B) Prensa hidráulica. (C) Corpo-de-prova após o seu rompimento .....	70
<b>Figura 3.28</b> – Equipamento utilizado para análise de fluorescência de Raio-X. ....	71
<b>Figura 3.29</b> – Difrátômetro de Raio-X instalado no CEFET-MG. ....	72
<b>Figura 3.30</b> – Microscópio eletrônico de varredura do Centro de Microscopia da UFMG.....	75
<b>Figura 3.31</b> – Microscópio eletrônico de varredura da empresa Phosther.....	75
<b>Figura 3.32</b> – Amostras de fragmentos de corpos-de-prova preparadas para MEV na UFMG.....	76
<b>Figura 3.33</b> – Microfotografias da superfície de ruptura da amostra obtida por MEV na UFMG.....	76
<b>Figura 3.34</b> – Microfotografias da superfície de ruptura da amostra obtida por MEV na Phosther. ....	76
<b>Figura 4.1</b> – Gráfico apresentando os índices de resistência das amostras ensaiadas (28 dias) .....	79
<b>Figura 4.2</b> – Morfologia de corpos-de-prova resultantes da ruptura na prensa hidráulica. ....	83
<b>Figura 4.3</b> - Difratograma de Raios X da amostra de cimento CP V. ....	89
<b>Figura 4.4</b> - Difratograma da fração da amostra de ardósia passante na peneira 0,075 mm .....	90
<b>Figura 4.5</b> - Difratograma da fração da amostra de ardósia passante na peneira 0,044 mm. ....	91

<b>Figura 4.6</b> - Difratoograma da fração da escória de alto forno evidenciando o seu estado amorfo.....	92
<b>Figura 4.7</b> - Difratoograma da fração da escória de alto forno evidenciando o seu estado amorfo.....	93
<b>Figura 4.8</b> - Difratoograma da fração da amostra da argamassa MB 24 .....	95
<b>Figura 4.9</b> - Difratoograma da fração da amostra da argamassa MB 25 .....	95
<b>Figura 4.10</b> - Difratoograma da fração da amostra da argamassa padrão.....	96
<b>Figura 4.11</b> – Superfície de ruptura da amostra MB 20 .....	101
<b>Figura 4.12</b> – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20 – Aumento: 150x .....	102
<b>Figura 4.13</b> – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20 – Aumento: 1000x. ....	102
<b>Figura 4.14</b> – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20 - Aumento: 2000 x .....	103
<b>Figura 4.15</b> – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20 - Aumento: 5000x .....	103
<b>Figura 4.16</b> – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20– Aumento: 2000x .....	103
<b>Figura 4.17</b> – Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 20. ....	104
<b>Figura 4.18</b> - Superfície de ruptura da amostra MB 21 .....	105
<b>Figura 4.19</b> – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 21– Aumento: 150x .....	105
<b>Figura 4.20</b> – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 21 – Aumento: 1000 x .....	105
<b>Figura 4.21</b> – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 21– Aumento: 2000 x .....	106
<b>Figura 4.22</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 21– Aumento: 3000 x .....	106
<b>Figura 4.23</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 21– Aumento: 5000x e 3000 x.....	106
<b>Figura 4.24</b> – Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 21 .....	107
<b>Figura 4.25</b> – Superfície de ruptura da amostra MB 24 .....	108

<b>Figura 4.26</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24– Aumento: 150x .....	108
<b>Figura 4.27</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24– Aumento: 1000 x .....	108
<b>Figura 4.28</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24– Aumento: 2000x .....	109
<b>Figura 4.29</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24 – Aumento: 5000x .....	109
<b>Figura 4.30</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24 – Aumento: 10000x .....	109
<b>Figura 4.31</b> - Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 24 .....	110
<b>Figura 4.32</b> – Superfície de ruptura da amostra MB 25 .....	111
<b>Figura 4.33</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25 – Aumento: 150 x .....	111
<b>Figura 4.34</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25 - Aumento: 500x .....	111
<b>Figura 4.35</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25– Aumento: 1000x .....	112
<b>Figura 4.36</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25 – Aumento: 1000x .....	112
<b>Figura 4.37</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25) – Aumento: 2000x .....	112
<b>Figura 4.38</b> - Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 25 .....	113
<b>Figura 4.39</b> - Superfície de ruptura da amostra padrão P20-21 .....	114
<b>Figura 4.40</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P20-21 – Aumento: 70 x .....	114
<b>Figura 4.41</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P20.21 – Aumento: 1000 x .....	114
<b>Figura 4.42</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P20.21 – Aumento: 1000 x .....	115
<b>Figura 4.43</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P.20.21) – Aumento: 2000 x .....	115

<b>Figura 4.44</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P20.21 – Aumento: 5000 x .....	115
<b>Figura 4.45</b> - Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra P20-21 .....	116
<b>Figura 4.46</b> - Superfície de ruptura da amostra padrão P24-25 .....	117
<b>Figura 4.47</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P24.25– Aumento: 150x .....	117
<b>Figura 4.48</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P24.25 – Aumento: 1000 x .....	117
<b>Figura 4.49</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P24.25 – Aumento: 1000 x .....	118
<b>Figura 4.50</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P24.25– Aumento: 2000x .....	118
<b>Figura 4.51</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P24.25– Aumento: 5000 x .....	118
<b>Figura 4.52</b> – Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra P24.25 .....	119
<b>Figura 4.53</b> - Fotomicrografia de duas superfícies de ruptura da amostra MB 25 - aumento de 5480x .....	124
<b>Figura 4.54</b> - Fotomicrografia de superfície de ruptura obtidas por MEV no modo SE (elétrons secundários). .....	125
<b>Figura 4.55</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25 (A) e MB 21 (B e C).....	126
<b>Figura 4.56</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra Padrão (28 dias) – Aumento: 5.550 x (A) e 3.400 x (B) .....	127
<b>Figura 4.57</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24. ....	128
<b>Figura 4.58</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20 (14 dias, 0,075mm).....	130
<b>Figura 4.59</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra Padrão (14 dias, 0,075mm).....	131
<b>Figura 4.60</b> - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra Padrão (28 dias, 0,044mm).....	131

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> – Relação das primeiras misturas para determinação da resistência à compressão.....	64
<b>Tabela 3.2</b> – Relação das misturas com os melhores resultados de resistência à compressão.....	65
<b>Tabela 4.1</b> – Resultados dos primeiros 14 ensaios de resistência à ruptura.....	77
<b>Tabela 4.2</b> – Resultados da resistência à compressão dos corpos-de-prova MB 20 a MB 25 (28 dias) .....	78
<b>Tabela 4.3</b> – Dados comparativos entre os resultados da resistência à compressão dos corpos-de-prova .....	80
<b>Tabela 4.4</b> - Composição química da ardósia e da escória utilizadas na pesquisa. ....	84
<b>Tabela 4.5</b> - Relação dos óxidos presentes nas amostras das argamassas com idade de 14 dias. ....	86
<b>Tabela 4.6</b> - Relação dos óxidos presentes nas amostras das argamassas com idade de 28 dias. ....	87
<b>Tabela 4.7</b> - Resultado das áreas superficiais .....	97



## LISTA DE SÍGLAS, ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

a/c	- Fator água/cimento
ABCP	- Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIROCHAS	- Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- Óxido de Alumino
AMAR-MG	- Associação dos Mineradores e Beneficiadores de Ardósia de Minas Gerais
ANEPAC	- Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
APL	- Arranjo Produtivo Local
ASTM	- American Society for Testing and Materials
BET	- Método desenvolvido por Brunauer, Emmett e Teller (técnica de análise para medição de área superficial específica de um material) ou Teoria de Adsorção Multimolecular
BLAINE	- Determinação da finura do cimento Portland pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)
BSE	- Elétrons retroespalhados
C2S	- Belita - Silicato dicálcico - 2CaO.SiO <sub>2</sub>
C3S	- Alita - Silicato tricálcico - 3CaO.SiO <sub>2</sub>
C-S-H	- Silicatos de cálcio hidratados C= CaO; S = SiO <sub>2</sub> ; H = H <sub>2</sub> O
C4AF	- Ferroaluminato tetracálcico 4CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
C <sub>6</sub> AS <sub>3</sub> H <sub>32</sub> / C-A-S-H	- Etringita
CaCO <sub>3</sub>	- Calcita
CaO	- Cal
Ca(OH) <sub>2</sub>	- Portlandita - Hidróxido de cálcio
CEN	- Comissão Europeia de Normatização
CEFET-MG	- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CETEC	- Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
CETEM	- Centro de Tecnologia Mineral
CH-I	- Cal hidratada tipo um
CO <sub>2</sub>	- Dióxido de carbono
COMIG	- Companhia Mineradora de Minas Gerais
CONAMA	- Conselho Nacional de Meio Ambiente

COPAM	- Conselho Estadual de Política Ambiental
CP	- Corpo de prova
CP II – E 32	- Cimento Portland composto com escória , classe 32
CP II- Z	- Cimento Portland composto com pozolana
CP III	- Cimento Portland de Alto-Forno
CP IV	- Cimento Portland pozolânico
CP V ARI	- Cimento Portland de alta resistência inicial
DER	- Departamento de Estradas de Rodagem
DEMAT/ CEFET-MG	- Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET MG
DEMC/EE/UFMG	- Departamento de Engenharia de Materiais e Construção/ UFMG
DESA/UFMG	- Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG
DET/ CEFET-MG	- Departamento de Engenharia de Transporte do CEFET-MG
DNPM	- Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	- Difração de Raios X
EDS	- Espectrometria por Dispersão de Energia de Raios X
EDX	- Fluorescência de Raios X (Energy Dispersive X Ray Fluorescence)
F1	- Farinha de cru (matéria-prima do clínquer) constituída de 15% de argila e 85% de calcário
F3	- Farinha de cru (matéria-prima do clínquer) constituída de 15% de ardósia e 85% de calcário
Fc	- Resistência à compressão do concreto
FEAM	- Fundação Estadual do Meio Ambiente
FEG	- Field emission gun
FIEMG	- Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
FRX	- Espectrometria de Fluorescência de Raios-X
IAP	- Índice de atividade pozolânica
Central IBEC	- Insumos Básicos Especiais para Concreto (nome próprio)
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IER	- Imagem de elétrons retroespalhados (no MEV)
IES	- Imagem de elétrons secundários (no MEV)
<i>In loco</i>	- No local
<i>In situ</i>	- No local

IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
IUPAC	- International Union of Pure and Applied Chemistry (União Internacional da Química Pura e Aplicada)
MB 01	- Amostra 01
MB 02	- Amostra 02
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	- Norma Brasileira
NUGEO	- Núcleo de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica da Escola de Minas de Ouro Preto - UFOP
P20	- Amostra padrão 20
P21	- Amostra padrão 21
P&D	- Pesquisa e Desenvolvimento
PF	- Perda ao fogo
RI	- Resíduo insolúvel
RMI	- Rochas e minerais industriais
SBET	- Área Superficial Específica
SE	- Elétrons secundários
SiO <sub>2</sub>	- Dióxido de silício
UFMG	- Universidade Federal de Minas Gerais
UFOP	- Universidade Federal de Ouro Preto
#	- mesh (malha de peneira)
Å	- angstrom (10 <sup>-10</sup> metros)
cal/g	- caloria por grama
cm <sup>2</sup>	- centímetro quadrado
cm <sup>3</sup>	- centímetro cúbico
eV	- elétron-volt
G	- grama
g/cm <sup>2</sup>	- grama por centímetro quadrado
g/cm <sup>3</sup>	- grama por centímetro cúbico
keV	- quiloelétron-Volt
N	- Newton (1000 N = 1 kN = 100 kgf)
kN	- Quilonewton
Kgf	- Quilograma força
kg/m <sup>3</sup>	- quilograma por metro cúbico

kgf/cm <sup>2</sup>	- quilograma força por centímetro quadrado
Km	- quilômetro
Km <sup>2</sup>	- quilômetro quadrado
kPa	- quilopascal
M	- metro
mm	- milímetro
MPa	- megapascal
t/ano	- tonelada por ano
t/mês	- tonelada por mês
Mm	- micrometro (10 <sup>-6</sup> metros)
nm	- nanômetro (10 <sup>-9</sup> metros)

## **ANEXOS**

Anexo I – Resultado da análise química da ardósia

Anexo II - Resultado de Fluorescência de Raio-X - EDX

Anexo III – Resultado do ensaio - determinação de área superficial pelo método BET

Anexo IV – Proposta comercial – preço da tonelada da escória

Anexo V – Verdés – Relatório de moagem da ardósia em moinho pendular <0,075mm

Anexo VI – Verdés – Relatório de moagem da ardósia em moinho pendular <0,044mm

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 JUSTIFICATIVAS .....	4
1.3 OBJETIVOS .....	12
1.3.1 Objetivo Geral.....	12
1.3.2 Objetivos Específicos .....	12
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	12
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 MINERAIS INDUSTRIAIS .....	14
2.2 ARDÓSIA.....	18
2.2.1 Caracterização da ardósia .....	18
2.2.2 Exploração e uso da ardósia.....	19
2.3 ESCÓRIA DE ALTO FORNO .....	25
2.4 AGREGADOS .....	28
2.5 ADIÇÕES MINERAIS NA ARGAMASSA E CONCRETO .....	33
2.5.1 Noções de dispersão e empacotamento de partículas na microestrutura da argamassa e do concreto .....	41
2.5.2 Uso da ardósia como adição mineral .....	46
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1 INTRODUÇÃO .....	50
3.2 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE ARDÓSIA .....	52
3.3 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (ABNT/NBR 7215/1996) .....	56
3.3.1 Componentes da argamassa em estudo.....	57
3.3.2 Equipamentos utilizados .....	60

3.3.3	Desenvolvimento do ensaio de ruptura.....	63
3.4	ENSAIOS QUÍMICOS DA ARDÓSIA E DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO	70
3.5	ENSAIOS DE ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS -X DAS ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE ARDÓSIA E ESCÓRIA.....	71
3.6	ENSAIOS DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X DO CIMENTO, ARDÓSIA E ESCÓRIA.....	72
3.7	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREA SUPERFICIAL POR MÉTODO BET.....	73
3.8	ENSAIOS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV	74
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....		77
4.1	ENSAIOS DE RUPTURA.....	77
4.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ARDÓSIA E DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO.....	84
4.3	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X DAS ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE ARDÓSIA E ESCÓRIA DE ALTO FORNO	85
4.4	DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X.....	88
4.5	DETERMINAÇÃO DE ÁREA SUPERFICIAL POR MÉTODO BET .....	97
4.6	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV .....	100
4.7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	119
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....		137
5.1	CONCLUSÕES.....	137
5.2	RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....	138
5.3	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	142
REFERÊNCIAS .....		144
ANEXOS .....		149

# **CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO**

## **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O maior polo de extração da rocha ardósia no país localiza-se no Estado de Minas Gerais, mais precisamente na zona do Alto São Francisco, envolvendo os municípios de Papagaios, considerado a capital nacional da pedra ardósia, Felixlândia, Paraopeba, Pompéu, Curvelo, Martinho Campos, Leandro Ferreira, Caetanópolis e Pitangui. Este agrupamento de municípios produtores é conhecido como a Província de Ardósia de Minas Gerais e engloba uma área aproximada de 7.000 km<sup>2</sup>, sendo responsável pela exploração de aproximadamente 90% deste bem mineral no Brasil (Carrusca, 2001; FEAM, 2014).

Como principal uso, a ardósia destaca-se na construção civil como pedra de revestimento para piso. Seguem-se telhas e tampos para mesa de bilhar, móveis decorativos, pias, lousa escolar e outros artefatos de decoração e artesanato.

A Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM estimou em 4.800.000 toneladas o total de desmonte de lavra relativo à produção de ardósia de Minas Gerais no ano de 2013 (FEAM, 2014). Esta extração tão expressiva desse bem mineral traz em sua bagagem um impacto ambiental significativo, com números também extremamente impactantes, pois o aproveitamento da rocha extraída em uma lavra de ardósia aproxima-se de 10% de recuperação, percentual que varia dependendo do estágio exploratório da lavra. Um lavra em início de produção ou com adversidades geológicas registra um aproveitamento em torno de 7%. Uma lavra com ótimo desenvolvimento exploratório poderá atingir 12% de recuperação. Assim, considerando para efeito de cálculo uma recuperação total de 10% do desmonte do setor no ano de 2013, pode-se prever que foram gerados aproximadamente 480.000 toneladas de rocha com aproveitamento para uso no mercado. Os restantes 4.320.000 toneladas, que correspondem a 90% da extração, são considerados rejeitos, sendo parte deste total absorvido como brita, mas a parcela mais expressiva deste total é descartada de forma



não conforme com a legislação ambiental no Estado, impactando o meio ambiente nesta região.

Em 2001, este autor, em seu projeto de Mestrado, propôs a caracterização tecnológica desses resíduos de ardósia e a busca de novas aplicações como mineral industrial, diminuindo o seu desperdício e dando ênfase para a reciclagem e o desenvolvimento de novos produtos. Citou, dentre várias, as indústrias de cerâmica vermelha, cimento Portland, plásticos, pozolanas, agregado leve para a construção civil, tintas e vernizes, asfalto, impermeabilização e cobertura de aterro sanitário, farmacêutica, ração animal, dentre outras. Nestes segmentos industriais, esse bem mineral deveria ser testado na forma de pó ou brita fina, buscando definir parâmetros que viabilizassem técnica e economicamente o seu emprego como um mineral industrial.

Esta pesquisa de Mestrado foi desenvolvida numa fábrica de cimento localizada na região metropolitana de Belo Horizonte – MG. Ancorada por ensaios específicos realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, desenvolveu uma nova farinha de cru para fabricação de clínquer, usando 85% de calcário e 15% de brita fina de ardósia em substituição aos 15% de argila. Esta farinha foi aprovada nos ensaios realizados na ABCP e na respectiva fábrica de cimento (Carrusca, 2001).

Especificamente para as ardósias, a FEAM (2014) reforça que é cada vez mais evidente a necessidade de seu aproveitamento integrado, como material de revestimento e como uso industrial. Sem esse aproveitamento integrado, ficam muito prejudicadas as bases de sustentabilidade econômica e ambiental exigidas para a preservação da atividade produtiva e multiplicação regional de seus benefícios, incluindo o social.

O uso da ardósia como mineral industrial implica em entender que uma das características marcantes dos minerais industriais é a grande diversidade de suas aplicações nos vários ramos da economia, especialmente na indústria de transformação, podendo acrescentar funções técnicas do tipo cargas minerais, enchimentos, catalisadores, filtrantes, agentes reguladores de fluxo, dentre outras, relacionadas com suas propriedades, explorando ao máximo a característica dos minerais industriais de serem utilizados pelas suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Segundo

Ciminelli (2003), as propriedades intrínsecas dos minerais industriais determinam as funções industriais, os desempenhos específicos e a competitividade de cada espécie nas aplicações industriais diversas.

Atualmente, pesquisas tecnológicas tratando do tema relacionado com adições minerais à argamassa e concretos estão sendo sistematicamente desenvolvidas nas Universidades, Centros de Pesquisa e indústrias do setor. Para Castro e Pandolfelli (2009), as argamassas e os concretos especiais não são mais uma simples mistura de cimento e água ou de cimento, água e agregados, respectivamente. Atualmente, é comum conterem aditivos químicos e adições minerais responsáveis por agregarem uma grande variedade de propriedades e características especiais a esses produtos. Concordam que nos últimos anos, os pesquisadores da tecnologia dos concretos têm desenvolvido muitas pesquisas buscando por materiais com desempenho mecânico e durabilidade cada vez maiores, resultando numa constante evolução do concreto, que é o material mais utilizado na construção. Para tanto, são necessários concretos obtidos a partir da engenharia de microestrutura.

Para Fonseca (2010), cresce o uso das adições devido à conscientização de que sua aplicação produz um material mais homogêneo e economicamente viável, permitindo a execução de estruturas com alta estabilidade dimensional e alta durabilidade em serviço. Já para Tutikian e Helene (2011), os requisitos básicos a serem atendidos nas dosagens ou traços regulando as adições minerais apontam a resistência mecânica do concreto como sendo o parâmetro mais frequentemente especificado.

As principais adições minerais dividem-se em dois grupos: materiais naturais e materiais de subproduto industriais. Mas para se obter concreto com determinadas características de desempenho é necessário uma criteriosa seleção dos materiais componentes e encontrar a combinação correta dos componentes.

Esta proposta de pesquisa no âmbito deste doutorado, busca o desenvolvimento de novos produtos relacionados com adições de ardósia na argamassa, em substituição parcial do cimento Portland, atuando como um dos insumos da mistura ternária

constituída de cimento Portland, ardósia finamente moída e escória de alto forno finamente moída, embasados nos fundamentos da geotecnia aplicada.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

Em 1992, Pêrsio de Souza Santos registrou em seu livro *Ciência e Tecnologia de Argilas*, volume 2, que

*[...] para 'fazer tecnologia' em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, é necessário criar não somente uma capacitação científica da melhor qualidade internacional, mas também aprender a habilidade de adaptar continuamente as diversas tecnologias internacionais às condições brasileiras e saber escolher o tipo de cooperação técnico-científica que forneça condições para as inovações tecnológicas de interesse nacional (Santos, 1992)*

Segundo Costa (2016), “*as indústrias siderúrgicas e mineradoras estão buscando uma destinação útil aos resíduos e rejeitos oriundos de suas produções*”. São, também, preocupações dos ambientalistas, órgãos de controle e instituições de pesquisas interessados na preservação do meio ambiente.

Costa (2016) escreveu em sua Tese de Doutorado:

*Não apenas nos setores da mineração e siderurgia, mas também na própria construção civil a busca constante pelo aproveitamento de seus rejeitos e resíduos ocupa hoje lugar de destaque na pesquisa e busca de tecnologia de novos materiais que contribuam para a sustentabilidade ambiental.*

*No século XXI é tarefa dos profissionais da construção civil a adequação dos princípios da construção sustentável ao cotidiano do trabalho, pois é grande a responsabilidade e a parcela deste setor no desenvolvimento sustentável.*

Para Fonseca (2010),

*As adições minerais têm sido utilizadas como insumo para a construção civil de forma cada vez mais intensa nas últimas décadas, sendo grande parte delas composta por resíduos provenientes de siderúrgicas, usinas termelétricas, indústrias e mineradoras – como a sílica ativa, cinzas volantes, escórias de alto-forno e filler.*

Neste contexto, o segmento de extração e beneficiamento de ardósia de Minas Gerais vem se destacando pela busca do estudo e desenvolvimento de tecnologias que transformem os rejeitos deste setor produtivo em bens minerais. E, com isto, minimizando os impactos ambientais oriundos desta cadeia produtiva.

Este autor desenvolveu pesquisa para o aproveitamento industrial de resíduos de ardósia como insumo mineral na fabricação de cimento, em substituição à argila, pautado na premissa que este polo produtor de ardósia para uso primordial na indústria da construção civil é responsável por significativos impactos ambientais e sociais nas áreas de lavra e unidade de beneficiamento. Volumes expressivos de rejeitos na forma de aparas ou pó, oriundos da baixa recuperação de placas com aproveitamento na construção civil, são descartados anualmente em bota-foras improvisados na natureza, próximos às lavras ou unidades de beneficiamento. Esse aproveitamento na extração varia de 7% a 15%, sendo o restante descartado como rejeito. São impactos ambientais irreversíveis, tais como grandes cavas abandonadas sem recuperação, formação de pilhas de grandes dimensões contendo estéril e rejeitos de lavras e serrarias, rejeitos sólidos em forma de pó e aparas de tamanho variável, e efluentes líquidos resultantes das operações de serragem e produção industrial (Carrusca, 2001).

No desenvolvimento do Plano de Ação para Sustentabilidade do Setor de Rochas Ornamentais – Ardósia em Papagaios, inserido no programa Gestão de Passivos Ambientais na Mineração elaborado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente-FEAM, reforçando o panorama atual, foram realizados levantamentos de campo e avaliação de imagens de satélite no período de maio a setembro de 2013, quando foram cadastradas 30 frentes ativas de lavra e 50 lavras paralisadas de ardósia para revestimento, e 137 pilhas de bota fora, onde se acumulam quase 100 milhões de toneladas de rejeitos minero industriais. Estas frentes de lavras, no total de 80, distribuem-se no polo produtor da seguinte forma: 30 lavras no Município de Papagaios, 12 em Felixlândia, 13 em Paraopeba, 6 em Curvelo, 6 em Pompeu, 4 em Martinho Campos, 6 em Leandro Ferreira, 2 em Caetanópolis e 1 em Pitangui. (FEAM, 2014).

Segundo FEAM (2014), com base no panorama atual sobre a geração de resíduos de ardósia no polo produtor, estima-se a seguinte situação:

*A partir da produção líquida anual de ardósias, estimada para Minas Gerais em meados da década de 2000, bem como dos índices finais de recuperação na lavra, calculou-se que estariam sendo gerados e acumulados, em pilhas de bota fora, pelo menos 5.000.000 t/ano de estéril e rejeitos. Apenas na área de bota fora das serrarias instaladas na cidade de Papagaios, área esta situada a 8 km da zona urbana, na estrada de acesso a Caetanópolis, estavam sendo acumulados cerca de 250.000 t/ano de cacos, cavacos e aparas de ardósia fresca, rejeitados no beneficiamento.*

*Tomando-se como base de cálculo o histórico da produção e início das atividades minerárias industriais na Província de Ardósia, pode-se estimar que, nos últimos 30 anos, tenham-se acumulado 100 milhões de toneladas de material nas dezenas de pilhas de bota fora conformadas. Apenas a pilha de rejeito das serrarias de Papagaios representaria quase 5% desse total.*

Carrusca (2001) observou que a minimização desse impacto ambiental deveria apoiar-se na implementação de pesquisa geológica sistemática e planos de lavra bem fundamentados na realidade local, num intenso gerenciamento ambiental nas áreas produtivas e no desenvolvimento de pesquisas tecnológicas com vistas à reciclagem dos resíduos de ardósia em segmentos industriais consumidores de grandes volumes de matéria-prima mineral na forma de pó ou brita fina.

Diante deste panorama, o *Projeto de Mestrado* desse autor definiu como objetivos:

*estudar a reciclagem de resíduos de ardósia oriundos de lavras e unidades de beneficiamento visando reduzir o impacto ambiental causado pelos depósitos de rejeitos; e*

*avaliar parâmetros técnicos, econômicos e ambientais com vistas à utilização industrial dos resíduos de ardósia na forma de pó. (Carrusca, 2001)*

Como resultado destes estudos, realizou-se a caracterização tecnológica desses resíduos e a busca de novas aplicações como mineral industrial, diminuindo o seu desperdício e dando ênfase para a reciclagem e o desenvolvimento de novos produtos. A metodologia adotada direcionou os trabalhos para o levantamento de indústrias caracterizadas por um consumo de matéria-prima mineral em grande escala, utilização dessa matéria-prima na forma de finos, e cuja localização não fosse afetada pelos custos do frete.

Os resultados dos ensaios químicos e físicos desenvolvidos nos laboratórios da fábrica de cimento CIMINAS/HOLCIM, do grupo Holdercin, localizada em Pedro Leopoldo-

MG, e da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, localizada em São Paulo-SP, consideraram as propriedades químicas e granulométricas dos resíduos de ardósia semelhantes às propriedades da argila empregada na fabricação tradicional do cimento. Foram elaboradas duas farinhas de cru, matéria-prima do clínquer, uma composta de 15% de ardósia e 85% de calcário (F3), e outra constituída de 15% de argila e 85% de calcário (F1) que, nos ensaios de laboratório da ABCP, comprovou-se a semelhança da composição química dessas farinhas, além de definir um maior rendimento na cominuição da farinha com ardósia por meio dos resultados dos testes de moagem e ensaios granulométricos a laser.

Conclui-se, através dos resultados das análises e caracterizações tecnológicas obtidos na pesquisa desenvolvida na fábrica de cimento e na ABCP, que a fase de laboratório foi considerada positiva. Nesta pesquisa, confirmou-se a possibilidade de se empregar as aparas de ardósia na forma de brita fina como constituinte da farinha de cru, em substituição à argila, na fabricação do clínquer (Carrusca, 2001).

Esta pesquisa pioneira, gerando um novo produto na cadeia industrial do cimento com a substituição da argila pela brita de ardósia, incentivou novos estudos e, após este projeto, surgiram inúmeros trabalhos implementando pesquisas tecnológicas para a inserção dos resíduos de ardósia como insumo mineral em diversos produtos, principalmente no setor de concreto e argamassa. Estudos estes desenvolvidos em Universidades e em Institutos e Centros de Pesquisa, visando a utilização industrial dos resíduos de ardósia.

Segundo FEAM (2014), os indicadores da atividade produtiva de ardósia para revestimento foram considerados negativos, devido às quedas anuais sucessivas nos quadros de produção e exportações. Mas fizeram a seguinte observação:

*[...] Enfatizou se, por outro lado, a multiplicidade vocacional das ardósias e a possibilidade de seu aproveitamento para usos industriais diversos. Uma das 'janelas de oportunidade' refere-se à promissora pressão de demanda de brita de ardósia para pavimentação de rodovias e insumo para a fabricação de cimento. Também muito promissora é a perspectiva de utilização dos produtos de expansão térmica das ardósias, para agregados leves, cimentos, fertilizantes agrícolas, etc.*

Este Plano de Ação da FEAM para o setor de ardósia concluiu que o novo grande vetor de desenvolvimento regional é o efetivo aproveitamento integrado da ardósia e seus resíduos de lavra e beneficiamento como materiais de revestimento e insumos industriais (FEAM, 2014).

Neste contexto, a tese preconizada pelo autor (Carrusca, 2001) acerca da importância do desenvolvimento de estudos tecnológicos visando o aproveitamento industrial dos resíduos da ardósia no segmento industrial do cimento, foi confirmada com a comprovação da aplicação desta pesquisa pela fábrica Holcim em Pedro Leopoldo, conforme relatado no Plano de Ação da FEAM (2014). Neste relato, os consultores geólogos Cid Chiodi Filho e Denize Kistemann Chiodi, e o Gerente de Produção Sustentável da FEAM Antônio Malard, no âmbito do programa Plano de Ação para Sustentabilidade do Setor de Rochas Ornamentais – Ardósia em Papagaios, instituído pela Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, reuniram-se em Pedro Leopoldo, em 29 de outubro de 2013, com gerentes do Setor de Qualidade Corporativa e do Setor de Meio Ambiente da fábrica Holcim, com o objetivo de tomarem conhecimento a cerca dos estudos e aplicações que a empresa está desenvolvendo sobre a utilização de resíduos de ardósia na sua linha de produção do cimento (FEAM, 2014). Nesta reunião, foram informados que

*[...] A Holcim está desenvolvendo a produção do cimento CPIV (pozolânico) e testando a utilização de ardósia como insumo. Atualmente a empresa adquire cerca de 1000 t/mês de ardósia, que participa em 5% da composição da massa do cimento CPIV. Também há a possibilidade de adição de ardósia no cimento CII Z, que é a variedade de CII com pozolana.*

Segundo a Holcim, ainda existem várias condicionantes técnicas e econômicas “que determinam a possibilidade desse uso. As condicionantes técnicas envolvem parâmetros químicos<sup>1</sup> (RI, CO<sub>2</sub> e P.F.)”. Quanto às condicionantes econômicas, a Holcim esclareceu que:

*[...] referem-se às vantagens da ardósia frente a outros insumos básicos, como calcário, argila e escória de alto forno, que teriam grande disponibilidade regional (FEAM, 2014).*

---

<sup>1</sup> RI: resíduo insolúvel; P.F.: perda ao fogo; CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono.

Ainda nesta reunião, os representantes da FEAM souberam que a matriz da Holcim na Suíça está efetuando testes de durabilidade/estabilidade do cimento CPIV com ardósia (a Holcim está substituindo ou pretendendo substituir a produção do CPIII pelo CPIV), verificando seu comportamento de longo prazo, sobretudo frente à ocorrência de reações álcali agregados.

Segundo a FEAM (2014), ficou patente “*que é tecnicamente viável utilizar ardósia no cimento. A forma de utilização ainda depende de estudos para se definir como e em que quantidade ela poderia ser adicionada*”.

Acrescentam que

*[...] A realidade de hoje é que as cimenteiras fazem todas as pesquisas necessárias para o desenvolvimento de seus produtos comerciais, sem participação ou apoio do setor público, o que não as obriga ou incentiva a compartilhar informações técnicas e econômicas. Essa é, aparentemente, uma situação comum à Holcim, Lafarge e Cimentos Liz (FEAM, 2014).*

Os resultados positivos da pesquisa pioneira do autor implementada no mestrado, substituindo a argila da farinha do clínquer por resíduos de ardósia, oficialmente comprovados pela Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM junto à própria indústria de cimento (FEAM, 2014), justificam essa nova pesquisa no âmbito deste Doutorado. Nesta pesquisa atual, busca-se o desenvolvimento de novos produtos relacionados com adições de ardósia na argamassa, em substituição parcial do cimento Portland, atuando como um dos insumos da mistura ternária constituída de cimento Portland, ardósia finamente moída e escória de alto forno finamente moída.

Atualmente, pesquisas tecnológicas tratando do tema relacionado com adições minerais à argamassa e concretos estão sendo sistematicamente desenvolvidas nas Universidades, Centros de Pesquisa e indústrias do setor. Vários autores, pesquisando estas adições minerais, embasam este tema em experimentos diversos abordando as propriedades físicas e químicas incrementadas ao novo produto. Cita-se, dentre muitos, os pesquisadores Mehta e Monteiro (2008) que publicaram o seguinte conceito sobre esta linha de estudos:



*[...] com controle de qualidade adequado, grandes quantidades de muitos subprodutos industriais podem ser incorporados ao concreto, em forma de cimento Portland composto ou como adição mineral. Sempre que um subproduto pozolânico e/ou cimentício pode ser usado em substituição parcial ao cimento Portland no concreto, há uma considerável economia de energia e de custo.*

Mehta e Monteiro (2008) também escreveram que

*[...] aditivos e adições são definidos como materiais que não sejam agregados, cimentos e água, e que são adicionados à dosagem do concreto imediatamente antes ou durante a mistura. O uso destes materiais no concreto é, hoje, amplamente adotado pelos muitos benefícios que são possíveis com suas aplicações.*

Mas os autores alertam que existem problemas associados ao mau uso de aditivos. Acreditam que a origem da maioria dos problemas parece estar na incompatibilidade entre um aditivo específico e uma composição de cimento ou entre dois ou mais aditivos que podem estar presentes simultaneamente. Daí, torna-se altamente recomendável que se realizem ensaios em laboratórios com os materiais e condições de campo antes da aplicação efetiva dos aditivos e das adições no concreto da obra (Mehta e Monteiro, 2008). Observa-se, ainda, que erros de dosagem podem produzir resultados bastante comprometedores (Carvalho Junior, 2005).

Para Mehta e Monteiro (2008), “o uso desses materiais pode, certamente, melhorar as propriedades do concreto, mas não se espera que compensem a má qualidade dos ingredientes do concreto ou má dosagem da mistura.” E alertam que a escolha dos materiais componentes do concreto devem ser tecnicamente aceitáveis e, ao mesmo tempo, economicamente atrativos.

Justifica-se, ainda, pelo fato de que o cimento custa muito mais do que os agregados. Portanto, todas as medidas possíveis devem ser tomadas para reduzir o consumo de cimento de uma mistura de concreto, sem sacrificar as características de desempenho desejadas, como a resistência e a durabilidade. Assim, as implicações econômicas da redução do consumo de cimento podem ser vultosas em projetos que requerem grandes quantidades de concreto.

*[...] Reduções ainda maiores nos custos são possíveis, sem comprometer as características de desempenho essenciais de uma mistura de concreto, se materiais*

*adequados e mais baratos forem encontrados para substituir uma porcentagem do cimento Portland (Mehta e Monteiro, 2008)*

Segundo Malhotra e Mehta (1996), cada adição mineral é única, e a sua seleção dependerá do projecto de construção requisitado, disponibilidade e custo. A vantagem da utilização das adições minerais está no seu baixo custo, considerando que o reaproveitamento de subprodutos industriais elimina a necessidade de se produzir parte dos componentes do concreto.

Assim, como substituto do cimento, geralmente na proporção a partir de 20% a 60% em massa, a utilização de tais subprodutos no concreto pode resultar em uma economia substancial de energia. E acreditam que, no futuro, um maior aumento da utilização de materiais pozolânicos de cimento e concreto virá a partir da realização de benefícios ecológicos associados com esse uso (Malhotra e Mehta, 1996).

Fonseca (2010), reforçando os conceitos definidores de adições minerais aqui expressos, escreveu que

*[...] na literatura geral sobre concreto, entretanto, há uma definição distinta para as adições, que não se confundem com os aditivos. As adições são utilizadas com o objetivo de somar ou mesmo substituir, parcialmente, a matéria-prima cimento (devido às suas propriedades semelhantes às do cimento), enquanto que os aditivos são utilizados para alterar as características do cimento, sem alterar sua proporção na composição do concreto.*

Segundo Carvalho Júnior (2005), em termos das proporções (em relação ao peso do cimento), até 5% tem-se aditivo, superior a 5% tem-se adições.

Assim, considerando a característica dos minerais industriais de serem utilizados pelas suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, esse projeto de doutorado busca avaliar os parâmetros técnicos, econômicos e ambientais com vistas à utilização dos resíduos de ardósia em segmentos consumidores de insumos minerais na forma de pó, seja na substituição de matérias-primas minerais básicas ou auxiliares indispensáveis dos processos de transformação industrial, seja na descoberta de novas matérias-primas através do desenvolvimento tecnológico (Carrusca *et al.*, 2000 a,b)

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Analisar o comportamento de misturas ternárias constituídas de cimento Portland, ardósia e escória de alto forno finamente moídas, em consonância com a norma técnica ABNT/NBR 7215/1996, sem o uso de aditivos dispersantes,.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar física e quimicamente os materiais constituintes da mistura ternária em estudo.
- Identificar os índices de resistência à compressão das misturas ternárias em suas diferentes dosagens.
- Explicar o comportamento dos índices de resistência à compressão a partir do entendimento microestrutural dos corpos de prova das misturas ternárias

## **1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA**

A apresentação da pesquisa foi estruturada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas, os quais estão descritos a seguir de forma resumida:

- no capítulo 1 tem-se a introdução, contemplando a importância e relevância do tema estudado, a justificativa, os objetivos e a estrutura da pesquisa;
- o capítulo 2 consiste de uma revisão da literatura, apresentando os principais aspectos dos minerais industriais, com destaque para a ardósia e seu aproveitamento como adição mineral em produtos cimentícios, além da escória de alto forno, agregados e fundamentos relacionados com as adições minerais na argamassa e concreto. A abordagem a cerca das adições minerais apoia-se, principalmente, nas noções de dispersão e empacotamento de partículas na microestrutura da argamassa e do concreto, em especial no efeito filler das micro partículas;

- o capítulo 3 aborda o programa experimental, sendo descritos, além da preparação dos materiais empregados na pesquisa, o planejamento dos experimentos e os métodos de ensaios utilizados, tendo como fundamento e diretriz da pesquisa a aplicação da norma técnica ABNT/NBR 7215/1996– Determinação da resistência à compressão;
- o capítulo 4 apresenta a análise e a discussão dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, em especial os resultados dos ensaios de ruptura das amostras de argamassa contendo misturas ternárias de cimento Portland, ardósia e escória de alto forno, ensaios químicos, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difractometria de Raios-X, correlacionando-os em favor da conclusão final dos trabalhos de pesquisa;
- o capítulo 5 finaliza com as conclusões desta pesquisa envolvendo uma argamassa com adição ternária de cimento Portland, ardósia e escória de alto forno finamente moídas, realçando a relevância da pesquisa e, concomitantemente, apresentando sugestões para futuros trabalhos de pesquisa visando reforçar os conhecimentos a cerca deste novo produto.

Finalizando, tem-se a apresentação das referências bibliográficas e os respectivos anexos, parte integrante do contexto da obra.

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MINERAIS INDUSTRIAIS

Ciminelli (2003) escreveu que

[ ] *O segmento de Minerais Industriais pode ser avaliado como um nicho de oportunidades de investimento em mineração. A categoria é constituída de diversas espécies minerais, que geram múltiplos produtos destinados a funções industriais diferentes, com características físicas, químicas e de desempenho específicas, serviços complementares adequados a cada cliente/segmento, que, por sua vez, permitirão ao empresário explorar possibilidades de agregação de valor e diferenciação de seu produto no mercado.*

Quanto ao aproveitamento desta categoria de bens minerais na indústria, Ciminelli (2003) relaciona a sua aplicação ao entendimento de que:

[...] *as propriedades intrínsecas dos minerais e aquelas derivadas ou modificadas pelos processamentos mais finos determinam as funções industriais, os desempenhos específicos e a competitividade de cada espécie nas aplicações industriais diversas. A funcionalidade permite a inserção dos minerais nas cadeias produtivas e articula-se com a logística como forma de segmentar e contextualizar os Minerais Industriais dentro da grande diversidade e amplitude de negócios que caracterizam este setor da mineração.*

Fernandes (1997) ressalta o caráter abrangente das aplicações dos minerais industriais nos vários ramos da economia, compreendendo assim todas as matérias-primas minerais básicas não metalúrgicas e não energéticas, insumos ou auxiliares indispensáveis dos processos de transformação industrial, como também, todos os materiais de natureza mineral obtidos como coprodutos, ou rejeitos do processamento industrial, ou ainda pela reciclagem ou recuperação de sucata. Na definição de Fernandes, minerais industriais são as rochas, minerais ou outros materiais de natureza mineral, quando consumidos em todas as suas aplicações não metalúrgicas e não energéticas por um amplo espectro de segmentos da indústria de transformação, pela própria indústria extrativa mineral ou utilizados diretamente por outras atividades econômicas, do tipo construção civil, agricultura, saneamento básico, entre outras. Segundo o DNPM (2014), a maior parte

dos minerais industriais, normalmente não são bens finais na cadeia produtiva, mas sim insumos essenciais para a produção desses bens.

Para Ciminelli (2003; 2007), o termo Minerais Industriais abrange

*[...] todas as rochas e minerais, incluindo os sintéticos de origem mineral, predominantemente não metálicos, que por suas propriedades físicas ou químicas, e não pela energia gerada ou pelos metais extraídos, podem ser utilizados em processos industriais, de modo geral com múltiplas funções, com maior ou menor valor agregado, ou como aditivo, diretamente como lavrado, ou após beneficiamento e processamento*

Estes preceitos reforçam, como uma das características marcantes dos minerais industriais, a grande diversidade de suas aplicações nos vários ramos da economia, especialmente os da indústria de transformação, podendo acrescentar funções técnicas do tipo cargas minerais, enchimentos, catalisadores, filtrantes, agentes reguladores de fluxo, dentre outras, relacionadas com suas propriedades (Carrusca, 2001).

Segundo Ciminelli (2003; 2007), o sucesso dos negócios com os Minerais Industriais vai depender do grau de intimidade dos produtores com o mercado, com os elos da cadeia produtiva e com as aplicações finais. A relação de segmentos industriais onde os Minerais Industriais podem ser utilizados é bastante extensa e diversificada,

*[...] incluindo desde indústrias farmacêuticas a cerâmicas tradicionais ou de alto desempenho, construção civil, papel, defensivos agrícolas, fertilizantes, tintas e plásticos de engenharia civil, entre inúmeros outros, incluindo os nichos e especialidades que são mantidos confidenciais pelos fornecedores devido à sua elevada atratividade.*

Em 2003, Ciminelli considerou como provável que os resíduos industriais e de mineração cresceriam em importância econômica e mercadológica nos 20 anos seguintes, diante de sua importância na sustentabilidade de operações industriais e minerais, na abertura de novos negócios e na reabilitação e na retomada de minas antigas. O foco da reciclagem seriam os depósitos e as operações industriais próximos aos grandes polos industriais e a recuperação de materiais de alto valor com tecnologias mais eficientes.

Para Ciminelli (2007), os pré-requisitos para a viabilização e valorização ótima dos empreendimentos neste setor mineral tem como base

*[...] conhecer as peculiaridades dos Minerais Industriais, diferenciando-os dos metálicos, que caracterizam a cultura mineral predominante no país, e contemplar as escalas mais adequadas e típicas para cada mineral não metálico. O foco no mercado deve ser assegurado em todas as fases da produção dos Minerais Industriais, já no início dos trabalhos geológicos em um novo depósito mineral.*

Luz e Lins (2005) fizeram referência à previsão de Kuzvart, citado por Calvo<sup>2</sup> (2001), que “as rochas e minerais industriais (RMIs) serão as matérias-primas típicas da segunda revolução industrial, as matérias-primas do terceiro milênio”, por serem imprescindíveis na fabricação de produtos demandados pela sociedade pós-industrial (plástico, fibra óptica, componentes eletrônicos, etc.).

Até aquele início dos anos 2000, o desinteresse pelos Minerais Industriais era tanto econômico quanto acadêmico. A carência de políticas oficiais que estimulassem este segmento também se explicava pela atuação muito restrita das instituições de ensino superior e de P&D (Ciminelli, 2003)

Ao longo de várias gerações de profissionais do setor mineral predominou a cultura dos minerais metálicos e das grandes empresas. Na classe dos minerais não metálicos, ou das rochas e minerais industriais, diferentemente, predomina a produção por pequenas e médias empresas, assim como por Arranjos Produtivos Locais-APLs (Luz e Lins, 2005).

Para Luz e Lins (2005), há outra característica dessa classe de minerais industriais que, para um grande número de substâncias minerais, a diferencia da classe dos minerais metálicos:

*[...] não há muita troca de informações nem se publica muito sobre os usos e as especificações, e cada empresa tende a considerar as características de seu produto como um segredo industrial. Outra diferença marcante é a possibilidade de agregar valor ao produto mineral, conferindo-lhe propriedades para usos específicos. Assim, enquanto cobre é cobre e ouro é ouro, negociados por preços cotados*

---

<sup>2</sup> CALVO, B. (2001). As rochas e os minerais industriais como elemento de desenvolvimento sustentável. Série Rochas e Minerais Industriais. n.3, CETEM, 37p

*internacionalmente, um produto de feldspato ou caulim, entre muitos outros, pode apresentar diferença de várias vezes no preço. A tecnologia, para esses casos, é um insumo fundamental.*

Esta afirmativa de Luz e Lins (2005) foi comprovada pela Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM em Minas Gerais, quando em reunião numa fábrica de cimento na região metropolitana de Belo Horizonte, tratando do uso de brita de ardósia na farinha do clínquer, ficou evidente que as empresas deste segmento industrial realizam as pesquisas visando o desenvolvimento de seus produtos sem interferência de outros segmentos, [...] *“o que não as obriga ou incentiva a compartilhar informações técnicas e econômicas”* (FEAM, 2014).

O Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM em 1994 previu no *“Plano plurianual para o desenvolvimento do setor mineral”* que o segmento de minerais industriais seria o segmento com maior registro da expansão da demanda na próxima década, devendo ser uma das prioridades da política mineral brasileira. E recomendou, dentre outras várias proposições, as seguintes ações:

*[...] estimular a especialização de laboratórios nas universidades e instituições de pesquisa.*

*[...] propor às Universidades e escolas técnicas a abordagem específica dos minerais industriais nos cursos básicos e de pós-graduação e criar cursos de especialização, enfatizando o estudo técnico dos mercados para minerais industriais e estimulando a abertura de novas linhas de pesquisa* (Carrusca, 2001).

No segmento de minerais industriais cerâmicos, com base na forte concorrência local e internacional principalmente devido à globalização da economia, Coelho (1996) ressaltou que as empresas necessitam de um aprimoramento tecnológico contínuo, aplicado na produção e comercialização dos bens. Desse modo, a absorção de novas tecnologias, que gerarão novos produtos e processos, aumenta as vantagens competitivas, além de manter a empresa em condições de responder às contínuas mudanças exigidas pelo mercado.

*“Para isto, será necessário, dentre outras adequações relacionadas com os obstáculos à competitividade internacional, o fortalecimento da indústria de minerais industriais, para que essa consiga os padrões internacionais, tanto no nível tecnológico quanto gerencial”* (Coelho, 1996).



Salienta-se que, os minerais industriais na sua maioria são cotados com valores muito baixos. Valores mais significativos dependem da agregação de novas tecnologias a esses minerais visando usos específicos na indústria de transformação, principalmente (COELHO, 1996). Cita-se como exemplo o mineral quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) que, dependendo da sua pureza, pode ser usado como insumo nobre na indústria de transformação, podendo citar a fibra ótica, chip de computador, uso como transdutor de energias, etc.

Segundo Ciminelli (2007),

*[...] as oportunidades para a conquista de novos espaços de mercado estarão voltadas para a capacidade dos investidores brasileiros de otimizar o desempenho funcional de seus Minerais Industriais em segmentos industriais diversos e de satisfazer diferenciadamente a demanda. No caso dos Minerais Industriais pode-se ainda ampliar a competitividade e o valor dos produtos pela segmentação e pela diferenciação de parâmetros técnicos, de desempenho e serviços.*

Mas ainda perduram alguns fatores que comprometem avanços e inovações, destacando:

*[...] 1. Produtores carentes de tecnologias e capacitação para desenvolvimento de novas aplicações. 2. Cultura de commodities contrária a desenvolvimentos de mercado. 3. Formação profissional inexistente. 4. Tecnologias e laboratórios de desenvolvimento não disponíveis para: micronização, classificação ultrafina e tratamento superficial. 5. Laboratórios de caracterização funcional pouco acessíveis. 6. Mercado sem acesso a literatura (Ciminelli, 2007)*

## **2.2 ARDÓSIA**

### **2.2.1 Caracterização da ardósia**

Em seu livro *Dana's Manual of Mineralogy*, James D. Dana definiu que as ardósias são:

*[...] rochas de granulação extremamente fina e possuem uma propriedade notável, conhecida como clivagem ardosiana, que lhes permite o desdobramento em lâminas delgadas e largas. Resultam, usualmente, do metamorfismo de folhelhos (Dana, 1969).*

Rodríguez e Bayón (1997) definem a ardósia da Espanha, o principal produtor e beneficiador dessa rocha na Europa, como sendo uma rocha metamórfica de baixo grau

e de origem sedimentar, formada a partir de rochas argilosas preexistentes, abundantes nos níveis do Paleozoico Inferior, correspondendo ao Ordovícico-Silúrico Inferior.

Estas rochas “*se transformam em ardósia quando submetidas a uma temperatura em torno de 400 °C e uma pressão aproximada de 300 MPa (sic), que produzem mudanças mineralógicas em sua estrutura*”. A direção desta pressão irá gerar uma orientação preferencial dos minerais componentes da rocha, originando uma textura típica das ardósias, denominada clivagem ardosiana, que são os planos de foliação muito marcantes, o que permite obter facilmente placas de espessura milimétricas (Rodríguez e Bayón, 1997).

Grossi Sad *et al.* (1998) definem as ardósias como sendo rochas metamórficas de baixo grau, pelíticas<sup>3</sup>, que têm clivagem ardosiana, isto é, orientação planar preferencial de minerais tabulares e prismáticos. Por causa disto, partem-se segundo superfícies planas. São homogêneas e de textura afanítica<sup>4</sup>. Sua dureza é média, a densidade é de cerca de 2,7 g/cm<sup>3</sup> e os principais minerais formadores são mica branca, quartzo e clorita .

As argilas, ao se consolidarem, transformam-se em argilitos e folhelhos<sup>5</sup>. Estes, por metamorfismo (elevação de pressão e temperatura), passam para ardósias e filitos. Nova ação de metamorfismo intenso transformam a ardósia e filitos em xisto e gnaisses (Grossi Sad *et al.*, 1998).

### **2.2.2 Exploração e uso da ardósia**

O início da exploração da ardósia em grande escala no Estado de Minas Gerais ocorreu na década de 70, em torno de 1976 a 1977. A principal área de extração e beneficiamento se concentra no município de Papagaios, e a exploração ocorre em lavra a céu aberto, em encosta e em cava (CETEC, 1984).

---

<sup>3</sup> Pelítica: grãos do tamanho silte e argila.

<sup>4</sup> Textura constituída por cristais muito finos, não identificados com a vista desarmada.

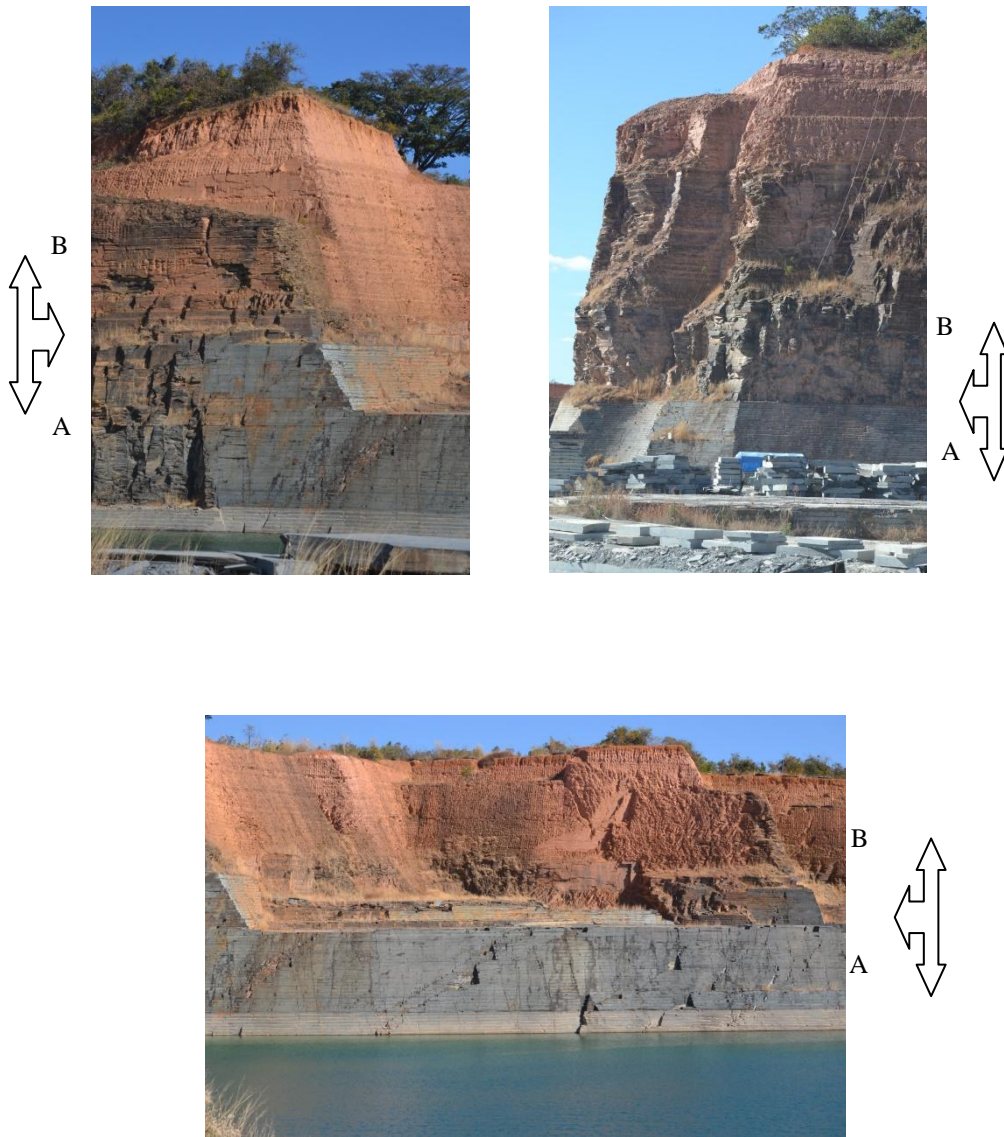
<sup>5</sup> Folhelho: os folhelhos são rochas sedimentares de granulação muito fina que se formaram pela consolidação de camadas de lama, argila ou silte, usualmente apresentando uma estrutura laminada fina (DANA, 1969).

Na região de Papagaios e Pompeu, os registros dos primeiros locais de exploração de ardósia datam do início dos anos 70. Eles apontam a fazenda denominada Olhos D'água como a precursora desta atividade, seguida das fazendas Rio Preto, Porto Mesquita, Veredas, Poços D'anta, Brejinho, Boa Vista e outras (Keller e Heller, 1996).

As jazidas são lavradas a céu aberto, em encosta e em cava. O capeamento estéril atinge, em muitos casos, espessuras em torno de 40 m e a recuperação varia de 7% a 12%, raramente atingindo 15% numa fase avançada de desenvolvimento. Na fase de implantação do desenvolvimento da lavra, a taxa de recuperação de material aproveitado como matéria-prima situa-se em torno de 5% a 10%. Os restantes 90% normalmente são descartados na natureza como rejeitos, próximo às lavras ou em terrenos próximos às serrarias.

O desmonte é realizado em bancadas e as chapas são extraídas do piso como pranchões ou lajão e lajinha, com espessura em torno de 15 a 25 cm. Os blocos de lajão e lajinha são retirados usando discos diamantados instalados em máquinas de chão. Esses blocos extraídos são liberados com cunhas manuais ou mecânicas e carregados por empilhadeiras. Algumas pedreiras de ardósia possuem entre 300 a 400 m de extensão e mais de 50 m de profundidade (Carrusca, 2001; FEAM, 2014).

A Figura 2.1 registra imagens de lavras de ardósia a céu aberto. Destacam-se os limites entre a rocha sã (A), com aproveitamento para revestimento na construção civil, e o capeamento de estéril (B), formado de rochas alteradas ou solo residual oriundos do intemperismo desta rocha *in situ*.



**Figura 2.1** - Lavras de ardósia a céu aberto.  
Fotos do autor, 2015

A primeira etapa do beneficiamento corresponde à abertura dos blocos, gerando placas, utilizando preferencialmente o martelo e talhadeira. Algumas indústrias de maior porte já possuem sistemas mais modernos de beneficiamento, com parte das atividades automatizadas. Em seguida, o esquadrejamento, acabamento de superfícies, calibração da espessura, cortes curvos e perfurações (Carrusca, 2001; FEAM, 2014).



**Figura 2.2** - Esquadreamento e uso de discos diamantados para corte de pranchões ou lajão.  
Fotos do autor, 2015



A



B

**Figura 2.3** - (A) carregamento de pranchões para serrarias e (B) abertura rudimentar de pranchões  
Fotos do autor, 2015 (A) e 2000 (B)

A Figura 2.4 a seguir mostra depósitos de rejeitos de lavra, formados de matacões, cacos e solo residual, localizados próximos à margem do rio Paraopeba, na rodovia MG 420. Já a Figura 2.5 registra depósitos de rejeitos de serraria, formados de aparas e lama, localizados no próprio terreno da serraria e em rua pública.



**Figura 2.4** - Depósitos de rejeitos de lavra nas margens do Rio Paraopeba, formados de cacos e solo residual.  
Fotos do autor, 2013



**Figura 2.5** - Depósitos de rejeitos de serraria em vias públicas, formados de aparas e lama.  
Fotos do autor, 2000.

Como principal uso, a ardósia destaca-se na construção civil como pedra de revestimento para piso, seguido de telhas e tampos para mesa de bilhar, móveis decorativos, pias, lousa escolar e outros artefatos de decoração (Carrusca, 2001).

Relatos de registros antigos de uso da ardósia atestados pelos achados arqueológicos guardados no *Museo Histórico de la Pizarra*<sup>6</sup> de San Pedro de Trones, localizado em Leon, na Espanha, referem-se a lajes de ardósia de origem romano e pré-romano. Estas ardósias toscamente lavradas e de contornos irregulares, eram utilizadas para cobertas de todo tipo de construção em assentamentos humanos situados nas proximidades de regiões contendo afloramentos desta rocha (Rodríguez e Bayón, 1997).

Dentre outros registros históricos, Rodríguez e Bayón (1997) relacionam o início do emprego na Europa, no século XI, de peças finas e regulares de ardósia aplicadas nas construções civis e militares.

Em outro registro, Keller e Heller (1996) escreveram que:

*“[...] a história da exploração e utilização da ARDÓSIA teve início a partir do século IX, com os primeiros jazimentos sendo explorados no País de Gales, com a finalidade de construção de telhados e calçamentos”.*

Velázquez, numa edição publicada em 1989 *apud* Masana (1997) faz menção às inscrições encontradas em 104 ardósias procedentes, quase todas, da zona centro-oriental de Lusitânia, onde aparecem temas cristãos, e cuja cronologia corresponde ao final do século VI ao século VII (Masana, 1997)<sup>7</sup>

Sintoni *et al.* (1981) comprovou o uso da ardósia como pó para: carga mineral na produção de impermeabilizantes; massas para juntas de dilatação; tintas para manutenção industrial; como matéria-prima alternativa em relação à escória na fabricação de lã de rocha; e como *material de enchimento* em produtos asfálticos.

O artigo *“The main characteristics of non-metallic raw materials and their industrial classification”* apresenta uma classificação industrial das matérias-primas minerais não-

---

<sup>6</sup> Pizarra: tradução de ardósia em espanhol.

<sup>7</sup> Fonte: endereço eletrônico – <http://www.ub.es/grat/grat14.htm>

metálicas definida por Ilich (1989), onde a ardósia aparece como insumo mineral nos setores industriais na forma de cargas e enchimentos, isolantes térmicos artificiais e materiais de construção (Fernandes, 1997).

Carrusca propôs a caracterização tecnológica desses resíduos de ardósia e a busca de novas aplicações como mineral industrial, diminuindo o seu desperdício e dando ênfase para a reciclagem e o desenvolvimento de novos produtos. Citou, dentre várias, as indústrias de cerâmica vermelha, plásticos, pozolanas, agregado leve para a construção civil, tintas e vernizes, asfalto, impermeabilização e cobertura de aterro sanitário, farmacêutica, ração animal, dentre outras. Nestas, esse bem mineral deverá ser testado na forma de pó ou brita fina, buscando definir parâmetros que viabilizem técnica e economicamente o seu emprego como um mineral industrial. De forma pioneira, em suas pesquisas de mestrado, confirmou a possibilidade de se empregar as aparas de ardósia na forma de brita fina como constituinte da farinha de cru, em substituição à argila tradicionalmente usada para a fabricação do clínquer que dará origem ao cimento Portland (Carrusca, 2001; FEAM, 2014).

A FEAM (2014) enfatizou que se deve realçar a multiplicidade vocacional das ardósias e a necessidade de seu aproveitamento para usos industriais, considerando como atributos positivos a granulação fina dos constituintes minerais, a homogeneidade química, o conteúdo de água intercrystalino, que determina a propriedade de expansão térmica, com possibilidade de uso para agregados leves, e o emprego dos rejeitos como material de base e sub-base para pavimentação asfáltica de rodovias (FEAM, 2014).

O item 2.5.2 apresenta algumas citações a cerca de estudos visando o uso da ardósia como adição mineral na indústria.

### **2.3 ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

As escórias siderúrgicas, historicamente consideradas como resíduos sólidos, adquiriram uma nova conotação nos mercados de todo o mundo em função de seu grande potencial de reutilização como matéria-prima ou insumo para outros processos (Fonseca, 2010).



A produção de escórias de alto-forno no Brasil é absorvida de forma quase exclusiva pelas indústrias cimenteiras, destacando as fábricas de cimento, para as quais se destina a maior parte do volume de escórias produzidas, para a fabricação de cimento (Fonseca, 2010).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), escória do alto-forno é um produto não metálico, formado essencialmente de silicatos e aluminossilicatos de cálcio e outras bases, e subproduto da indústria siderúrgica gerado a partir da produção do ferro gusa, também chamado de ferro fundido. É um material obtido pela cominuição da escória de alto-forno que se solidifica pelo resfriamento lento sob condições atmosféricas.

A escória granulada é um produto vítreo ou não-cristalino que se forma quando a escória de alto-forno fundida é rapidamente resfriada pela imersão em água. É chamada granulada devido às partículas terem dimensões de areia. Quando o resfriamento é rápido e ao ar e com quantidade limitada de água, apresenta-se em forma de pelotas, sendo chamado de escória peletizada (Mehta e Monteiro, 2008).

Resulta da combinação, em elevadas temperaturas, dos minerais da canga de minério de ferro, das cinzas do carvão mineral (coque) ou do carvão vegetal e do calcário utilizado como fundente. Constitui-se de uma mistura de cal, sílica e alumina, ou seja, os mesmos óxidos que constituem o cimento Portland, porém em proporções diferentes (Neville, 1982 apud Fonseca, 2010; Moreira, 2006).

A escória granulada de alto-forno é definida pela Norma Brasileira NBR 5735/1991, referente a cimento Portland de alto-forno, como sendo o subproduto do tratamento do minério de ferro em alto-forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, constituído em sua maior parte de silicatos e aluminossilicatos de cálcio.

Quando a escória de alto-forno sofre um resfriamento lento, obtém-se a escória resfriada ao ar ou escória expandida, que apresenta coloração que varia entre cinza escuro e marrom. Esta escória não deve ser usada como material cimentício, porém pode ser usada como agregado para concretos, asfaltos e lastros. Quando a escória passa por um

processo de resfriamento rápido – normalmente através de jatos de água ou vapor d'água sob alta pressão – obtém-se a escória granulada ou peletizada, que é um material predominantemente amorfo e potencialmente reativo. A granulação altera completamente as propriedades da escória, mantendo-a num estado semelhante a um líquido subarrefecido, ou seja, conserva no estado sólido a estrutura do líquido, apresentando-se no estado amorfo. A escória granulada apresenta estrutura vítrea e coloração amarelada, bege ou cinza, podendo apresentar propriedades cimentícias quando finamente moída (Dal Molin, 2005 apud Fonseca, 2010).

Moreira (2006) também atesta que, do ponto de vista mineralógico, pode-se dizer que as escórias são menos inertes geoquimicamente que os agregados naturais.

*[...] A composição mineralógica da escoria de alto forno, depende do tipo de resfriamento. Quando é submetida a esfriamento rápido, constitui-se majoritariamente vítrea, e aptas para serem utilizadas como aditivos ou ligantes hidráulicos; quando se esfria lentamente, constituem-se majoritariamente cristalinas, aptas para serem utilizadas como agregados. Esta última apresenta-se como uma mistura estável composta por silicoaluminato cálcico e magnésio (Moreira, 2006).*

Segundo Fonseca (2010), a escória de alto-forno precisa ser moída até se atingir um nível desejável de tamanho das partículas ou de área superficial, dependendo do grau de ativação necessário e de fatores econômicos. Para ser utilizada como adição mineral, a escória de alto-forno também precisa passar pelo processo de secagem antes de ser moída.

A escória granulada é utilizada como adição ou substituto parcial do cimento Portland em misturas de concreto em betoneiras, bem como na fabricação de cimentos compostos, onde está presente no cimento Portland de alto-forno (CP III) e no cimento Portland composto com escória (CP II E).

As propriedades fundamentais das escórias dependem

*[...] da hidraulicidade, (capacidade ou não de alguns de seus óxidos reagirem em meio saturado, formando sais insolúveis e estáveis) que, por sua vez, depende de sua composição química e principalmente da sua forma de obtenção, seja no estado sólido vítreo resfriado ou no estado sólido cristalino resfriado (Moreira, 2006).*

Alguns fatores que afetam a hidraulicidade das escórias de alto-forno são: grau de vitrificação, composição química, composição mineralógica e finura (Fonseca, 2010).

Segundo Moreira (2006),

*[...] As escórias vítreas mantêm as propriedades hidráulicas desejadas para a indústria cimenteira, pois se comportam termodinamicamente instáveis e hidraulicamente latentes podendo ser ativadas, em função de sua granulometria em meio aquoso. As escórias cristalinas, ou seja, aquelas resfriadas lentamente, carecem de propriedades hidráulicas e são em sua maioria, termodinamicamente estáveis, comparativamente às escórias vitrificadas, comportando-se relativamente como agregados inertes, e são classificados na classe 3 - NBR-1004 – materiais inertes.*

O principal problema do uso da escória siderúrgica reside na variação de sua composição química e das propriedades físicas e mecânicas. Dentre estas, destaca a potencialidade à expansão devido à mudança de composição durante a cura, que conduz ao desenvolvimento de pressões que degradam os concretos (Frazão, 2007).

Do ponto de vista geotécnico,

*[...] os agregados constituídos de escórias cristalizadas de alto forno, são caracterizados e avaliados de maneira análoga a outros agregados, tendo-se em conta que, as escórias podem apresentar sensíveis aos estados de saturação em água, e a variações de pequenos intervalos de temperaturas, devendo portanto, serem avaliadas sob a possibilidade de sua desagregação / desintegração / decomposição (Moreira, 2006).*

## **2.4 AGREGADOS**

As rochas, como materiais de múltiplas aplicações e uso intenso, dão uma significativa contribuição às obras de engenharia sendo empregadas, dentre tantas utilidades, como agregados graúdos e miúdos.

Segundo Frazão (2007), devido à elevada variedade, as rochas naturalmente apresentam requisitos de maior ou menor resistência e durabilidade. Por este motivo sua seleção para atender às exigências de uma obra requer cuidados:

*[...] o eventual mau comportamento das pedras numa construção não pode ser imputado ao “acaso”. Existem pedras de boa qualidade que não suportam uma má engenharia, mas existem boas engenharias que bem trabalham com pedras de qualquer qualidade.*

O conhecimento das características petrográficas dos agregados, bem como de suas propriedades físicas e mecânicas,

*[...] permite uma melhor previsão de seu comportamento como componente de uma obra civil. Com a evolução da tecnologia, os critérios de qualificação e seleção dos agregados avançam e estão plenamente à disposição da engenharia de construção (Frazão, 2007)*

Segundo Neville e Brooks (2013), aproximadamente 3/4 do volume de concreto são ocupados pelos agregados, o que reforça a importância da qualidade destes agregados. Eles limitam a resistência do concreto e, também, suas propriedades afetam significativamente a durabilidade e o desempenho estrutural.

O agregado na construção civil é definido como sendo todo material granular encontrado na natureza ou proveniente de fragmentação mecânica, como a areia, pedregulho, pedrisco, rocha britada, escória de alto-forno ou resíduos de construção e de demolição, que é usado com um meio cimentício para produzir concreto ou argamassa (Mehta e Monteiro, 2008).

Pode ser classificado pela sua dimensão, em *agregado graúdo* (pedra britada e pedregulho), com dimensões acima de 4,75mm (retidos na peneira nº 4), e *agregado miúdo* (areia natural ou de britagem), com partículas variando suas dimensões entre 75µm (peneira 200) e 4,75mm. (Frazão, 2007; Mehta e Monteiro, 2008).

A origem desses agregados para concreto, compreendendo areia, pedregulho e pedra britada (ou brita), são as jazidas naturais e esses são chamados agregados minerais naturais. Constituem a classe de agregados mais importantes para a produção de concreto de cimento Portland. Os materiais termicamente processados, como a argila e o folhelho expandidos, que são utilizados para a produção de concreto leve, são chamados de agregados artificiais (Mehta e Monteiro, 2008). Para Frazão (2007), são

classificados como *agregados naturais* o cascalho e a areia natural e como *agregados artificiais* a pedra britada e a areia de britagem.

Considerando a massa unitária, a maioria dos agregados minerais naturais, como a areia e pedregulhos, tem massa unitária de 1520 a 1680 kg/m<sup>3</sup> e produzem concretos de densidade normal com aproximadamente 2400 kg/m<sup>3</sup>. Para fins especiais, agregados de menor ou maior densidade podem ser utilizados para a produção de concretos leves ou pesados, respectivamente. Os concretos leves geralmente estão relacionados com agregados com massa unitária menor do que 1120 kg/m<sup>3</sup>. Os concretos pesados pesam mais de 2800 kg/m<sup>3</sup> (Mehta e Monteiro, 2008).

A Norma Técnica NBR 12655:2006 (ABNT, 2006) também classifica os agregados segundo sua massa específica: agregados leves, com massa específica  $\leq 1.800 \text{ kg/m}^3$ , e agregados densos ou pesados, com massa específica  $\geq 3.000 \text{ kg/m}^3$ . (Fonseca 2010).

Outra classificação do agregado segundo Frazão (2007) é pela sua densidade, dividindo-se em *pesado* (barita, magnetita, etc.), *normal* (pedra britada e pedregulho) e *leve* (argila expandida, vermiculita, etc.).

Antes de serem usados na construção civil, devem ser analisados e caracterizados tecnologicamente, ressaltando que as principais propriedades de interesse para este segmento são as geológicas (petrográficas e físico-químicas), físicas e mecânicas. E as propriedades físicas e mecânicas dos agregados são altamente influenciadas pelas propriedades geológicas (Frazão, 2007).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as características relevantes dos agregados resultam da composição mineralógica da rocha fonte, das condições de exposição a que a rocha foi submetida antes de produzir o agregado e do tipo de equipamento usado para a sua produção.

Destacam como principais propriedades físicas a densidade, massa específica, porosidade, capacidade de absorção d'água, massa unitária, granulometria, adesividade, dentre outras. Como propriedades mecânicas, tem-se impacto, esmagamento, abrasão,

dentre outras. Para cada tipo de aplicação dos agregados é exigido o conhecimento de um conjunto de propriedades desses agregados. Mas, a maioria dos produtores em todas as regiões do país não dão a devida atenção à caracterização tecnológica dos agregados.

*[...] principalmente porque a cadeia da construção civil não vem exigindo informações técnicas sobre eles. Tal situação não exime, porém, os construtores do dever de melhor conhecer os materiais com os quais trabalham. (Frazão, 2007).*

Mehta e Monteiro (2008) escreveram que os agregados são considerados relativamente baratos e não entram em complexas reações químicas com a água. Por isso, têm sido tratados como material de enchimento inerte do concreto. Mas, esta visão tem sido revista devido à mudança na compreensão do desempenho de muitas propriedades importantes do concreto influenciadas pelos agregados. Segundo eles,

*As características relevantes do agregado para a composição do concreto incluem: porosidade, composição ou distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipo de substância deletérias presentes (Mehta e Monteiro, 2008).*

Para Neville e Brooks (2013),

*[...] eles não são realmente inertes, já que suas propriedades físicas, térmicas e algumas vezes químicas influenciam no desempenho do concreto, por exemplo, melhorando sua estabilidade dimensional e durabilidade em relação às da pasta de cimento.*

O agregado antes era tido como um material inerte disperso por entre a pasta de cimento, principalmente por razões econômicas. No entanto, atualmente, é possível adotar um ponto de vista oposto e considerar o agregado como um material de construção ligado em um todo coesivo por meio de uma pasta de cimento, (Neville e Brooks, 2013).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a massa específica dos agregados, composição granulométrica e teor de umidade são importantes para a definição das dosagens de concreto. A porosidade ou massa específica, granulometria, forma e textura superficial determinam as propriedades do concreto no estado fresco. A porosidade e a mineralogia do agregado afeta sua resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade. Essas características também influenciam várias propriedades do concreto endurecido.

Assim, as propriedades do agregado afetam não apenas as características de dosagem do concreto, mas também o comportamento do concreto nos estados fresco e endurecido.

E, a partir de considerações teóricas, pode-se também prever que, independentemente da relação água-cimento, a dimensão, forma, textura superficial e mineralógica das partículas de agregado influenciarão as características da zona de transição na interface e, portanto, afetarão a resistência do concreto (Mehta e Monteiro, 2008).

A maioria dos agregados minerais naturais constituídos de areia, pedregulho e brita aplicados no concreto originam-se das rochas sedimentares. Esses agregados, oriundos de rochas sedimentares, diferem dos agregados oriundos das rochas ígneas principalmente nas características relacionadas com forma, textura, porosidade, resistência e sanidade. As rochas ígneas são densas e resistentes pois são formadas sob alta pressão, enquanto as sedimentares, formadas naturalmente sob baixa pressão, tendem a ser mais porosas e menos resistentes, além de conterem frequentemente impurezas que podem comprometer seu uso como agregados.

Mehta e Monteiro (2008) citam como exemplo que *“alguns calcários e arenitos podem ter resistência à compressão menor do que 100 MPa, o que os torna inadequados para o concreto de alta resistência”*. Quanto às rochas metamórficas, são densas mas frequentemente folheadas, oriundas de rochas magmáticas ou sedimentares, que tiveram suas propriedades e características textuais e estruturais originais modificadas devido a alta pressão e temperaturas provocadas pelo metamorfismo.

Frazão (2007) descreve os três grupos de rochas usadas como materiais de construção da seguinte forma:

- Rochas ígneas - constituídas da agregação de minerais originados da consolidação por resfriamento de material rochoso que se encontra em estado líquido, por efeito da fusão a altíssima temperatura. Estas rochas ígneas podem ser classificadas, conforme o seu teor de sílica, em ácidas (> 65%), intermediárias (65 a 52%), básicas (52 a 45%) e ultrabásicas (<45%).

Nos tipos ácidos, o silício está presente tanto na forma de óxido (sílica), como na de silicato. Cita-se como exemplos, granitos (rochas plutônicas ácidas); sienitos (rochas intermediárias); basaltos (rochas básicas extrusivas) e diabásios (rochas básicas hipoabissais); piroxenitos (rochas ultrabásicas plutônicas).

- Rochas sedimentares – são chamadas clásticas ou detríticas quando são originadas de fragmentos (sedimentos) de rochas preexistentes, os quais são transportados e se depositam em um dado ambiente, sendo consolidadas por pressão de sobrecarga das camadas superiores e/ou por cimentação. As rochas sedimentares clásticas são, em geral, menos resistentes que as rochas ígneas. Cita como exemplo os arenitos, siltitos e argilitos. Outros tipos de rochas sedimentares são as químicas, formadas a partir de íons dissolvidos na água, combinando e precipitando na forma de substância, em geral, cristalinas. Cita como exemplo os calcários e dolomitos. Para Frazão (2007), os calcários sedimentares são, também, de baixa resistência e pouco indicados como material de construção.
- Rochas metamórficas – resulta da transformação de rochas preexistentes modificadas através de processos geológicos envolvendo o aumento de pressão e/ou temperatura, sem que o ponto de fusão dos seus minerais seja atingido. São modificações nas associações mineralógicas, na textura e na estrutura. Cita-se como exemplos, filitos, ardósias, gnaisses, quartzitos e outros. Os gnaisses destacam-se como os mais usados na construção civil para a produção de pedras britadas.

## **2.5 ADIÇÕES MINERAIS NA ARGAMASSA E CONCRETO**

Mehta e Monteiro (2008) definem aditivos e adições como sendo os materiais diferentes de cimento, agregados e água e que “*são adicionados à dosagem do concreto imediatamente antes ou durante a mistura*”.

Abordando os fatores positivos desta adição, destacam que os aditivos químicos podem modificar a pega e as características de endurecimento da pasta de cimento, influenciando na hidratação do cimento. Já os aditivos redutores de água influem na plastificação de misturas de concreto fresco pela redução da tensão superficial da água.



A durabilidade do concreto aplicado em ambiente de baixa temperatura pode ser influenciada positivamente pela inclusão de aditivos incorporadores de ar. Quanto às adições minerais, como as pozolanas, podem reduzir a fissuração por tensões térmicas no concreto massa, por exemplo (Mehta e Monteiro, 2008).

Gomes (2014), define adições minerais como sendo materiais pozolânicos ou cimentantes que são adicionados às argamassas e aos concretos em substituição ou não à massa de cimento Portland, com capacidade de conferir propriedades específicas ao produto. Segundo ele, citando Mehta e Monteiro (1994), os materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silico-aluminosos que em si mesmo possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando finamente divididos e na presença da água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes, formando compostos com poder aglomerante. Isto é, pozolana + hidróxido de cálcio + água = C-S-H (silicato de cálcio hidratado). O silicato de cálcio hidratado <sup>8</sup> (C-S-H) resultante apresenta-se como um poder aglomerante. (Mehta e Monteiro, 1994 apud Gomes, 2014).

Já os materiais cimentantes, Gomes (2014) define como sendo materiais hidráulicos que desenvolvem as suas propriedades à temperatura ambiente, pela ação de ativantes alcalinos (p. ex. cal, silicato de sódio e hidróxido de sódio). Cita como exemplo a escória de alto forno.

Os termos "aditivos minerais" ou "materiais complementares de cimentação" são muitas vezes utilizados para representar todos os materiais pozolânicos e cimentícios, independentemente do seu desenvolvimento e benefícios derivados da sua utilização. E, nesse início do século 21, nenhum concreto está isento de ter incorporado na sua constituição os aditivos minerais (Malhotra e Mehta, 1996)

Segundo Malhotra e Mehta (1996), os materiais pozolânicos e cimentícios incluem não só subprodutos industriais, tais como cinzas volantes, escória de alto forno, sílica ativa, e cinzas de arroz-palha, mas também materiais provenientes de fontes naturais.

---

<sup>8</sup> C = CaO; S = SiO<sub>2</sub>; H = H<sub>2</sub>O; A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; S = SO<sub>3</sub>

As adições minerais são definidas por Mehta e Monteiro (2008) como sendo materiais silicosos finamente divididos, normalmente adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, que variam de 20 a 70% por massa do material cimentício total. Para eles,

*[...] embora as pozolanas naturais em estado bruto ou após ativação térmica ainda sejam usadas em algumas partes do mundo, devido a aspectos econômicos e ambientais, muitos subprodutos industriais tem se tornado fonte primária de adições minerais no concreto.*

Para Neville e Brooks (2013), os materiais pozolanas e escória de alto-forno podem ser considerados como adições com propriedades cimentícias, já que reagem principalmente com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos do cimento.

Nas décadas de 1940 e 1950, os esforços para promover a introdução desses materiais no concreto em larga escala encontraram grande resistência porque havia pouca compreensão sobre seu modo de ação, ocasionando muitas experiências insatisfatórias. Atualmente, a situação é diferente. Os aditivos e as adições se tornaram de tal forma partes integrantes das misturas de concreto. (Mehta e Monteiro, 2008)

Castro e Pandolfelli (2009) concordam que nos últimos anos, os pesquisadores da tecnologia dos concretos têm desenvolvido muitas pesquisas buscando por materiais com desempenho mecânico e durabilidade cada vez maiores, resultando numa constante evolução do concreto, que é o material mais utilizado na construção. Para tanto, são necessários concretos obtidos a partir da engenharia de microestrutura. Segundo os autores,

*[...] por serem compósitos constituídos de partículas com granulometria fina (tamanho máximo  $\leq 4750 \mu\text{m}$ ) e uma baixa relação água/cimento, esses concretos apresentam matrizes densas obtidas a partir da otimização do empacotamento dos materiais granulares, enquanto a trabalhabilidade adequada é obtida com a dispersão das partículas promovida pela incorporação de aditivos químicos à mistura. Além disso, utilizam adições minerais que são, na grande maioria, subprodutos industriais [...]* (Castro e Pandolfelli, 2009).

Carvalho (2008) define materiais compósitos, também denominados de materiais conjugados ou compostos, como sendo

*[...] a união de dois ou mais materiais com o objetivo de obterem-se propriedades especiais não apresentadas isoladamente pelos seus componentes por meio da utilização de métodos convencionais.*

Assim, para Castro e Pandolfelli (2009) a produção destes concretos especiais desenvolvidos por meio da engenharia de microestrutura, com trabalhabilidade adequada (quando no estado fresco) e alta resistência mecânica e durabilidade (quando no estado endurecido), é possível devido à associação de aditivos superplastificantes (aditivos químicos) e adições minerais. Os superplastificantes permitem a obtenção de misturas com baixa relação água/cimento (menor que 0,30), enquanto as adições minerais, com grãos de tamanhos menores que as partículas de cimento, facilitam a produção associando seu efeito físico (efeito fíler) ao efeito químico (reação pozolânica).

Pelo aumento da área de contato entre a argamassa e o substrato pode-se explicar o acréscimo de aderência. A aderência é um fenômeno de contato entre superfícies: quanto maior a proximidade destas, mais intensas as forças intermoleculares responsáveis por tal propriedade (Kendall, 2001, apud Costa *et al.*, 2016)

Algumas adições minerais são pozolânicas (como cinza volante de baixo teor de cálcio), algumas cimentantes (como a escória granulada de alto-forno), enquanto outras são tanto cimentantes quanto pozolânicas (como as cinzas volantes com alto teor de cálcio).

As principais adições minerais dividem-se em dois grupos: materiais naturais e materiais de subproduto industriais. Os subprodutos industriais podem, em algumas situações, para serem utilizados como adição mineral, exigirem algum processamento complementar, como por exemplo, secagem, pulverização, dentre outros (Mehta e Monteiro, 2008)

Para se obter concreto com determinadas características de desempenho, Mehta e Monteiro (2008) defendem que uma criteriosa seleção dos materiais componentes é o

primeiro passo. O passo seguinte é um processo chamado dosagem do concreto, que significa encontrar a combinação correta dos componentes.

Segundo estes autores, “*a dosagem do concreto é o processo de obtenção da combinação correta de cimento, agregado, água, adições e aditivos, para produzir o concreto de acordo com as especificações dadas*”.

Tutikian e Helene (2011) entendem por estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland os

*[...] procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também conhecido por traço. Essa proporção ideal pode ser expressa em massa ou em volume, sendo preferível e sempre mais rigorosa a proporção expressa em massa seca de materiais.*

E complementam afirmando que

*[...] no Brasil, ainda não há um texto consensual de como deve ser um estudo de dosagem. A inexistência de um consenso nacional cristalizado numa norma brasileira sobre os procedimentos e parâmetros de dosagem tem levado vários pesquisadores a proporem seus próprios métodos de dosagem, muitas vezes confundidos com uma recomendação da instituição para a qual trabalham, ou através da qual foram publicados.*

Para Mehta e Monteiro (2008), grandes quantidades de muitos subprodutos industriais, com controle de qualidade adequado, podem ser incorporados ao concreto em forma de cimento Portland composto ou como adição mineral. Sempre que um subproduto pozolânico e/ou cimentício pode ser usado em substituição parcial ao cimento Portland no concreto, há uma considerável economia de energia e de custo.

Segundo eles, podem ser claramente percebidos os efeitos da dosagem no custo do concreto e em importantes propriedades, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

Deve ser realizado um estudo de dosagem visando obter a mistura ideal e mais econômica, numa determinada região e com os materiais ali disponíveis, para atender

uma série de requisitos. Essa série será maior ou menor, segundo a complexidade do trabalho a ser realizado e segundo o grau de esclarecimento técnico e prático do usuário do concreto que demandou o estudo (Tutikian e Helene, 2011).

Muitos dos princípios que fundamentam os procedimentos da dosagem do concreto alicerçam-se no reconhecimento de que o custo do cimento é muito superior ao custo dos agregados. Daí a meta de reduzir o consumo de cimento de uma mistura de concreto, sem sacrificar as características de desempenho desejadas, como a resistência e a durabilidade. E a redução do consumo do cimento pode gerar implicações econômicas significativas em projetos que requerem grandes quantidades de concreto (Mehta e Monteiro, 2008).

E estas reduções nos custos ainda podem ser maiores, sem comprometer as características de desempenho essenciais de uma mistura de concreto, “*se materiais adequados e mais baratos forem encontrados para substituir uma porcentagem do cimento Portland*”. Como exemplo, cita a substituição de cimento Portland por materiais pozolânicos ou resíduos cimentícios (como cinzas volantes ou escória granulada de alto-forno) que, sob a maioria das condições, pode resultar em economia direta no custo dos materiais, além de não serem dispostos inadequadamente no meio ambiente (Mehta e Monteiro, 2008).

Tutikian e Helene (2011) reforçam que

*[...] deve-se considerar como materiais passíveis de uso nos concretos e possíveis de serem utilizados num estudo de dosagem: os vários cimentos, os agregados miúdos, os agregados graúdos, a água, o ar incorporado, o ar aprisionado, os aditivos, as adições, os pigmentos e as fibras.*

E Fonseca (2010), conclui que

*[...] as adições minerais, tanto nos dias atuais como ao longo da história das construções, têm uma importância inequívoca na execução de obras de concreto, seja em sua aplicação diretamente ao concreto como substitutivo parcial ao cimento Portland, seja na produção de cimentos, substituindo parcialmente o clínquer.*

As aplicações das adições minerais são inúmeras, as quais precisam ser objeto de constante atenção quanto ao controle de qualidade de suas características, seja na execução correta dos serviços de concretagem, seja na escolha adequada dos materiais e sua proporção na mistura.

*[...] É consenso geral que a presença das adições minerais na pasta de cimento em hidratação gera processos de refinamento do tamanho de poros e de grãos, reduzindo o tamanho e o volume dos vazios e microfissuras, bem como dos cristais de hidróxido de cálcio no concreto, causando assim um ganho substancial em sua resistência e impermeabilidade (Fonseca, 2010).*

Para Costa *et al.* (2016), nos sistemas cimentícios a interface substrato-matriz cimentícia é o elo fraco por ser mais porosa que a própria matriz.

*[...] Essa interface pode ser otimizada pela redução do teor de água, pela compactação, pela adição de partículas finas ou pelo grau de hidratação. A penetração de partículas e a precipitação de cristais no interior dos poros e/ou rugosidade do substrato poderá contribuir com a aderência (Carasek, 1996; Carvalho Junior, 2005, apud Costa et al., 2016), no entanto tal contribuição irá depender da geometria dos poros e das partículas. É indispensável que as características reológicas e a distribuição de partículas da matriz sejam compatíveis com a superfície do substrato (porosidade/rugosidade), de modo a garantir seu total recobrimento (Costa et al., 2014).*

A porosidade e a extensão da interface irão depender do tamanho mínimo das partículas presentes na matriz. A adição de partículas finas, menores que o cimento, à matriz poderá ser uma das alternativas para aumentar a área de contato. Por apresentarem uma área específica elevada, poderão reduzir a porosidade da interface pelo preenchimento das irregularidades da superfície e dos vazios entre as partículas (Costa *et al.*, 2014).

Para Fonseca (2010), cresce o uso das adições devido à conscientização de que sua aplicação produz um material mais homogêneo e economicamente viável, permitindo a execução de estruturas com alta estabilidade dimensional e alta durabilidade em serviço.

Exemplifica mostrando alguns benefícios proporcionados pela adição de escória de alto-forno nos concretos: aumento na durabilidade do concreto; melhoria na resistência à compressão e à flexão; melhoria na resistência química a ataque por sulfatos; melhoria

na resistência à reação álcali-agregado; aumento na resistência à corrosão de armaduras; redução da tensão térmica (menor calor de hidratação); diminuição da permeabilidade do concreto.

Mehta e Monteiro (2008) reforçam o entendimento que, como benefício, as adições minerais no concreto podem

*[...] melhorar a resistência à fissura térmica devido ao baixo calor de hidratação; aumento da resistência final e impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, fortalecimento da zona de transição na interface, e uma durabilidade muito maior no que diz respeito ao ataque por sulfato e à expansão pela reação álcali-agregado.*

Para Tutikian e Helene (2011), os requisitos básicos a serem atendidos nas dosagens ou traços regulando as adições minerais apontam a resistência mecânica do concreto como sendo o parâmetro mais frequentemente especificado.

*[...] a resistência à compressão dos concretos tem sido tradicionalmente utilizada como parâmetro principal de dosagem e controle da qualidade dos concretos destinados a obras correntes. Isso se deve, por um lado, à relativa simplicidade do procedimento de moldagem dos corpos-de-prova e do ensaio de compressão, e, por outro lado, ao fato de a resistência à compressão ser um parâmetro sensível às alterações de composição da mistura, permitindo inferir modificações em outras propriedades de concreto.*

Conclusões equivocadas e contraditórias, relacionadas com um plano inadequado de dosagem, reforça a afirmativa dos autores que qualquer estudo de dosagem dos concretos tem fundamentos científicos e tecnológicos fortes, mas sempre envolve uma parte experimental em laboratório e/ou campo.

Chies *et al.* (2014)<sup>9</sup> também afirmam que

*[...] o controle tecnológico do concreto só pode ser considerado um procedimento de qualidade, quando todas as suas fases são realizadas adequadamente. O ensaio de resistência à compressão tem importância incontestável no controle tecnológico das estruturas de concreto bem como no desenvolvimento tecnológico do material.*

Com relação ao requisito *durabilidade*, Tutikian e Helene (2011) defendem que os concretos devem ser duráveis frente às solicitações às quais serão expostos durante sua

---

<sup>9</sup> [http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas\\_ibracon/riem/volume7\\_n5.asp](http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/riem/volume7_n5.asp)

vida útil. A *durabilidade* é considerada um tema muito complexo que depende de muitas variáveis e, por isso, ainda não tem método consensual para ser medida.

*[...] depende tanto de fatores extrínsecos aos concretos, tais como presença de sais, maresia, chuvas ácidas, umidade relativa, natureza das solicitações mecânicas a que ficarem sujeitos, quando de fatores intrínsecos, tais como tipo de cimento, relação água/cimento (a/c), adições, aditivos e outros (Tutikian e Helene, 2011)*

Para os autores, o conceito de *durabilidade* está associado ao conceito dos mecanismos de transporte ou de penetração de agentes agressivos em materiais porosos: capilaridade, difusibilidade, migração iônica e permeabilidade (Tutikian e Helene, 2011).

Fonseca (2010) finaliza as suas conclusões na sua dissertação de mestrado escrevendo que a correta compreensão a respeito das adições minerais na durabilidade do concreto é fundamental para a sua adequada aplicação de forma econômica e sustentável.

### **2.5.1 Noções de dispersão e empacotamento de partículas na microestrutura da argamassa e do concreto**

As argamassas e os concretos especiais não são mais uma simples mistura de cimento e água ou de cimento, água e agregados, respectivamente. Atualmente, é comum conterem aditivos químicos e adições minerais responsáveis por agregarem uma grande variedade de propriedades e características especiais a esses produtos (Castro e Pandolfelli, 2009).

Para Castro e Pandolfelli (2009), estes concretos

*[...] estão se tornando bastante complexos, uma vez que produtos minerais e amorfos – além do clínquer – interagem com moléculas orgânicas ou polímeros desenvolvidos especialmente para realçar certas propriedades ou para corrigir algumas deficiências dos cimentos existentes.*

Os vários tipos de interação, dentre elas “*as forças de atração interpartículas (forças de van der Waals), forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e a forte interação ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratos*”, fazem com



que as partículas de cimento, quando entram em contato com a água, apresentem uma grande tendência à aglomeração. A formação desta estrutura aglomerada implica

*[...] na retenção de certa quantidade da água de mistura e, com isso, na geração de uma rede aberta de canais entre as partículas. Essa rede de vazios pode aprisionar parte da água que, por essa razão, fica indisponível para hidratar a superfície das partículas de cimento e para fluidificar a mistura. (Castro e Pandolfelli, 2009).*

Castro e Pandolfelli (2009) descrevem que esses aglomerados formados pelo contato com a água influenciam a reologia das suspensões e podem interferir no empacotamento e, conseqüentemente, na microestrutura do material. Como consequência, os produtos podem apresentar maior quantidade de defeitos e com microestruturas heterogêneas.

*[...] por isto, os aglomerados devem ser eliminados, provocando a dispersão das suspensões usando aditivos e evitando a sedimentação de partículas e conseqüente segregação de fases.*

Para a dispersão das suspensões, as forças de repulsão entre as partículas devem superar as forças de atração.

*[...] Esses aditivos são eficientes na desaglomeração das estruturas de partículas de cimento e em sua dispersão, evitando uma ligação prematura, minimizando a quantidade de água necessária para a adequada trabalhabilidade da suspensão e resultando em misturas trabalháveis pelo intervalo de tempo necessário à sua aplicação (Castro e Pandolfelli, 2009).*

As forças atuantes entre as partículas de cimento compreendem as forças de van der Waals (forças de atração) e as forças de repulsão eletrostática geradas pela carga elétrica presente na superfície das partículas. Porém, com a adição de um aditivo, as forças de repulsão eletrostática são aumentadas e, com isso, forças de repulsão estérica são geradas, realçando o aumento de densidade local causado pela sobreposição de camadas de aditivo adsorvido. Assim, a força atuante, resultante entre as partículas de cimento em coexistência com um aditivo, é representada pela somatória de todas as forças presentes, isto é, pela somatória das forças de atração de van der Waals e das forças de repulsão eletrostática e estérica. Além disso, a força atuante entre as partículas de cimento depende da distância entre elas, que por sua vez está relacionada com a energia de interação entre as partículas (Castro e Pandolfelli, 2009)

A melhora na fluidez, para a aplicação do material, é conseguida principalmente por uma melhor dispersão das partículas sólidas por meio de forças de repulsão, dentre outros mecanismos e tipos de forças que coexistem em uma suspensão à base de cimento.

Quando forças de atração de van der Waals são dominantes entre as partículas, o conjunto resulta na atração e as partículas tendem a aglomerar; porém, na presença de aditivos superplastificantes, o conjunto resulta na repulsão e as partículas permanecem separadas. Com relação a isto, as adições minerais podem influenciar as forças eletrostáticas dependendo de sua origem mineralógica e do estado das cargas da superfície de suas partículas. Como as forças coloidais também dependem da distância média entre as partículas vizinhas, a interposição de grãos desses materiais mais finos entre as partículas de cimento pode interferir na atração eletrostática e, conseqüentemente, na estrutura dos aglomerados. Da mesma forma, substituindo o cimento por um material com área específica diferente, muda-se a área superficial molhável e a quantidade de água adsorvida. Algumas adições, contendo uma determinada solubilidade em água, podem modificar a solução eletrolítica e, assim, as forças eletrostáticas (Castro e Pandolfelli, 2009).

Para estes autores (2009), *“como os materiais à base de cimento estão dentro da faixa de suspensões densas, as partículas têm que se afastarem, especialmente quando aglomerados são formados”*. O efeito filer sobre a reologia depende da distribuição granulométrica e da forma das partículas presentes. A viscosidade das suspensões geralmente aumenta à medida que se afasta da curva granulométrica ideal e atinge um mínimo para um determinado volume de água e para um arranjo de partículas mais compacto. Além do mais, qualquer divergência da forma esférica implica no aumento da viscosidade para um volume de pasta constante. Assim, na presença de superplastificante, quanto mais fina e mais esférica for a adição mineral incorporada, melhores serão as propriedades reológicas da mistura.

Um filer é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland, que, devido às suas propriedades físicas, tem efeitos benéficos sobre as propriedades do concreto, como trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade

exsudação capilar e tendência à fissuração. Em geral, são quimicamente inertes, mas podem apresentar alguma propriedade hidráulica. Podem melhorar a hidratação do cimento Portland atuando como pontos de nucleação (Neville e Brooks, 2013).

Dal Molin (2005) define o filer como sendo

*[...] um material finamente dividido sem atividade química, cuja atuação é basicamente um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (Dal Molin, 2005, apud Fonseca, 2010).*

Mais recentemente, o fato de que muitos dos materiais naturais e industriais trabalhados diariamente são compostos de partículas de diferentes formas e tamanhos, tem motivado um maior interesse pelo estudo do empacotamento das partículas nos diferentes segmentos da engenharia. Nesta área, as partículas são grãos de agregados, minerais, metais ou pós-químicos, solos, moléculas, poros ou rochas, cujo comportamento depende parcialmente das propriedades das partes que os compõem e parcialmente das interações entre elas (Castro e Pandolfelli, 2009)

Segundo esses autores,

*[...] o estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (Castro e Pandolfelli, 2009).*

A fluidez inicial de suspensões concentradas, tais como o concreto, também depende de considerações físicas, isto é, da distribuição granulométrica, do índice de forma e da textura superficial das partículas. Sendo assim, o projeto da distribuição de tamanho de partículas é de fundamental importância, pois promove o empacotamento e, juntamente com o fluido, define as propriedades reológicas do material durante o processo de mistura e quando no estado fresco (Castro e Pandolfelli, 2009).

Para o desenvolvimento dos concretos de alta resistência e de alto desempenho, as características de empacotamento das partículas são de fundamental importância.

Atualmente, com a utilização de um superplastificante, os concretos de alto desempenho possuem uma maior densidade devido à redução na quantidade de água de mistura.

[...] Além disso, componentes finos e ultrafinos, com formato esférico – adições – têm sido adicionados às misturas tanto para facilitar o auto-adensamento quanto para garantir uma melhor compactação e preenchimento dos vazios existentes entre os grãos, aumentando ainda mais a densidade desses materiais (Castro e Pandolfelli, 2009)

Assim, o conceito de uma “alta densidade de empacotamento foi recentemente redescoberto como um parâmetro chave para a obtenção de materiais cimentícios de ultra-alto desempenho” (Castro e Pandolfelli, 2009).

Os superplastificantes são chamados, também, de aditivos redutores de água de alta eficiência. Isto porque possibilitam a redução de três a quatro vezes a água de amassamento em uma determinada mistura de concreto comparado aos aditivos redutores normais de água. São surfactantes aniônicos de cadeia longa, de alta massa molecular que, quando adsorvido nas partículas de cimento, produz forte carga negativa que ajuda a diminuir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e eleva a fluidez do sistema (Mehta e Monteiro, 2008).

A elevada dispersão das partículas do cimento na água acelera a taxa de hidratação, fazendo com que se observe mais comumente a aceleração da pega e endurecimento, ao invés do retardamento. O aumento nas propriedades mecânicas (resistência à compressão e à flexão) normalmente é proporcional à redução na relação água/cimento. E, frequentemente, devido à maior velocidade de hidratação do cimento no sistema bem disperso, as misturas de concreto que contém superplastificantes apresentam resistência à compressão ainda maiores no tempo de um, três e sete dias, comparado com o concreto de referência com a mesma relação água/cimento (Mehta e Monteiro, 2008).

A nova geração de superplastificantes, em vez da repulsão eletrostática para provocar a dispersão do cimento, adotou a inibição de sítios reativos através da dispersão (Mehta e Monteiro, 2008).

Para Mehta e Monteiro (2008),

*[...] pode-se concluir que a consequência global da adição de um aditivo químico a um sistema cimento Portland-água será determinada por uma série de efeitos complementares e opostos, que dependem do tipo e da concentração de íons fornecidos pelo aditivo à solução.*

Concretos com resistência à compressão de aproximadamente 150 MPa (medida em corpos-de-prova cilíndricos) estão sendo produzidos em laboratórios devido à utilização simultânea de aditivo superplastificante e de adições minerais. Esses materiais, considerados de alto desempenho, podem interessar não apenas por causa da elevada resistência mecânica, mas também por outras características, tais como o maior módulo de elasticidade, menor exsudação, menor fluência e retração e maior durabilidade (Castro e Pandolfelli, 2009).

### **2.5.2 Uso da ardósia como adição mineral**

A partir de 2001, após a publicação dos resultados da pesquisa desenvolvida no projeto de mestrado deste autor, intitulado “*Aproveitamento industrial de resíduos de ardósia como insumo mineral na fabricação de cimento*” (Carrusca, 2001), onde a ardósia substitui a argila na formulação da farinha de cru do clínquer, outras pesquisas foram desenvolvidas em Centros de Tecnologia públicos e privados e nas Universidades brasileiras, conforme preconizado por vários autores aqui referenciados. Dentre vários exemplos abordando o aproveitamento industrial da ardósia como substituição ou adição mineral, foram relacionados a seguir cinco resumos de estudos para ilustrar esta busca de novas aplicações para esse bem mineral na indústria.

Maria Eugênia M. C. SILVA, em sua tese de Doutorado intitulada “*Caracterização de produtos gerados no processo de expansão térmica de rejeitos de ardósia*” (Silva, 2005), realizou ensaios de expansão térmica das diferentes variedades de ardósia produzidas em Papagaios e região, objetivando avaliação dos produtos na indústria cimenteira. A ardósia natural não apresentou propriedades pozolânicas para argamassa de cimento, quando avaliada pelos métodos químico e físico. Mas, segundo ambos os métodos, a ardósia expandida confirmou a pozolanicidade.

A composição química das ardósias, após a expansão térmica, apresentou variações pouco significativas. Os valores da massa específica e da resistência mecânica foram inferiores e os valores de absorção de água dos produtos de expansão foram mais altos, com exceção das ardósias de cor vinho, verde e preta, que não apresentaram alterações. Apesar da variação, pode-se considerar que os valores estão abaixo dos índices de absorção de água necessários para materiais pozolânicos.

Devido ao caráter pozolânico, os produtos resultantes da expansão térmica das ardósias podem ser aplicados como adição mineral substituindo parcialmente o clínquer do cimento Portland. Segundo a ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, os ensaios realizados demonstram melhora na qualidade do cimento, demandando-se estudos em escala industrial para definição da economicidade do processo.

Silva (2005) concluiu que o tratamento dos rejeitos de ardósia, pelo processo de expansão térmica, promove o desenvolvimento das atividades pozolânicas do material.

Souza, L. P. F. e Mansur, H. S. (2000), analisando material fino resultante das unidades de beneficiamento de ardósia, revelaram que a grande concentração das partículas são, em sua maioria, micrométricas e com tamanho variável entre 1 e 10  $\mu\text{m}$ . E que aproximadamente 80% das partículas presentes são menores que 10  $\mu\text{m}$ . Segundo eles, esse tamanho de partícula é favorável para utilização do pó em processamento cerâmico que requer tamanhos menores, facilitando o processo de tratamento térmico.

Os principais constituintes identificados através da técnica de difração de raios-X foram: quartzo, clinocloro, moscovita, albita e ortoclásio. Durante o tratamento térmico, foram observadas reações de grande importância associadas ao clinocloro e a moscovita. Nas faixas de temperatura entre 500°C e 600°C esse constituintes perdem a camada de  $[\text{OH}^-]$  presente em suas estruturas, por volta de 900°C e 1000°C ocorre a destruição de seus retículos cristalinos. Observou-se também que o amolecimento da rocha acontece próximo a temperatura de 1000°C.

Beraldo, Vieira e Nagumo (2006)<sup>10</sup>, no trabalho apresentado em Congresso na UNICAMP intitulado *Argamassa de cimento Portland e pó de ardósia*, buscaram substituir parcialmente o agregado miúdo (areia) da argamassa de cimento por porcentagens variáveis de pó de ardósia. Este material particulado foi gerado na forma de uma lama, resultante do corte de placas dessa rocha em serras refrigeradas em água.

Foram efetuados ensaios de caracterização física do agregado alternativo. Posteriormente, foram elaborados corpos-de-prova cilíndricos de argamassa de cimento e areia (1:3 em massa), com vários teores de substituição da areia pelo pó de ardósia, os quais foram avaliados por meio de ensaio não destrutivo (ultra-som) e de compressão simples (NBR 7215). Os resultados evidenciaram a possibilidade de substituir parcialmente a areia pelo pó de ardósia, propiciando um considerável ganho ambiental.

Os autores concluíram que

*A análise dos resultados obtidos nos diferentes ensaios aplicados aos materiais investigados (curva de hidratação, velocidade de propagação do pulso ultra-sônico e compressão simples) indicou a possibilidade de poder efetuar-se a substituição parcial da areia em argamassas de cimento Portland por resíduo do processamento de ardósia, na forma de pó. Os resultados obtidos indicam que até 30% pode ser o teor de areia a ser substituída, embora ensaios de durabilidade ainda devam ser aplicados ao material para verificar o seu comportamento perante situações mais críticas de exposição às intempéries.*

Ferreira, I.F. *et al.* (2007), apresentaram um artigo na 59ª Reunião Anual da SBPC UFPA, Belém, intitulado “*Avaliação de Resíduos de Ardósia e de Carbureto de Cálcio como Materiais Pozolânicos em Argamassas*”, onde concluíram que o pó de ardósia e o pó de carbureto apresentam características de pozolanicidade capazes de permitir a substituição de parte do cimento por estes materiais em argamassas de assentamento.

A aluna Júlia Piazi Lima (LIMA, 2015), do CEFET-MG, Campus 1 de Belo Horizonte, com a orientação desse autor Prof. Evandro Carrusca e coorientação do Prof. Mateus J. da Silva, desenvolveu o seu Trabalho de Conclusão de Curso-TCC no curso de Engenharia Ambiental e Sanitária intitulado “*Caracterização de agregados reciclados de rejeitos de ardósia para fabricação de tubos de concreto*”

---

<sup>10</sup> FEAGRI - Trabalhos completos em anais de congressos - Unicamp  
[www.unicamp.br/anuario/2006/FEAGRI/FEAGRI-0012.html](http://www.unicamp.br/anuario/2006/FEAGRI/FEAGRI-0012.html)

Estes tubos são fabricados por uma empresa de pré- moldados em Papagaios-MG e os ensaios com os corpos de prova desenvolvidos pela aluna obtiveram os seguintes resultados:

- 1. A absorção de água dos corpos de prova confeccionados com agregados reciclados de ardósia (CPR) alcançaram valores maiores que os confeccionados com agregados convencionais (CP-A).*
- 2. Os corpos de prova confeccionados com os agregados reciclados de ardósia alcançaram menores valores de massa específica seca e massa específica saturada comparados ao convencional.*
- 3. A resistência a compressão simples do concreto confeccionado com agregados reciclados de ardósia apresentou valores maiores do que o convencional [...]*
- 4. Com base nos resultados do ensaio de tração a partir da compressão diametral, comprovou-se que os corpos de prova confeccionados com os agregados reciclados alcançaram maiores valores de resistência em relação ao convencional (CP-A).*

Piazi conclui que os resíduos de ardósia, largamente descartados como rejeitos nas frentes de lavra de ardósia, podem ser utilizados parcialmente como agregados naturais na fabricação de manilhas do tipo "Tubo de Concreto Simples".



## **CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

A proposta inicial desta pesquisa de Doutorado teve como primeira meta fabricar um clínquer em escala industrial com base nos resultados da pesquisa pioneira desenvolvida pelo autor no laboratório da fábrica de cimento em Pedro Leopoldo-MG, no ano de 2001. Na época, após estes resultados, discutiu-se com os engenheiros da fábrica a realização de uma batelada para testes em escala industrial. Por motivos operacionais e econômicos, os testes seriam desenvolvidos no período que antecede à paralisação de um dos fornos para limpeza e manutenção mecânica. (Carrusca, 2001).

Seriam usadas, aproximadamente, 40 toneladas de brita fina de ardósia, equivalente a 15% da composição da farinha, 227 toneladas de calcário (85%), totalizando 267 toneladas de farinha, produzindo experimentalmente 172 toneladas de clínquer, cujo produto final do processo industrial seria analisado de acordo com as normas técnicas adotadas pelo setor (Carrusca, 2001).

Diante dos impedimentos atuais para viabilizar esta proposta pioneira como pesquisa no doutorado, buscou-se o apoio do Professor Doutor Abdias Magalhães Gomes para o desenvolvimento da pesquisa tecnológica para aplicação de resíduos de ardósia como adição mineral no segmento cimentício. O tema definido foi analisar as propriedades de uma argamassa composta por uma mistura ternária de cimento, ardósia e escória finamente moídos, tendo como referencia a norma técnica ABNT/NBR 7215/1996, relevando os ganhos econômicos e ambientais por ventura resultantes.

No primeiro momento, em 2012 e 2013, foram realizadas reuniões em Papagaios-MG com alguns empresários do setor de extração e beneficiamento de ardósia, os quais apresentaram um cenário atual recessivo deste segmento naquela região e a expressiva preocupação para encontrarem novas aplicações industriais para os rejeitos da ardósia. Naquela oportunidade, colocaram-se à disposição para fornecerem as amostras de ardósia necessárias para a pesquisa. Também confirmaram o fornecimento de brita de ardósia para algumas fábricas de cimento na região metropolitana de Belo Horizonte,

para uso como insumo mineral na linha de produção do cimento. *A posteriori*, a FEAM (2014) registrou esta comercialização e o uso da ardósia na fabricação de cimento.

Em novembro de 2013, o autor proferiu palestra no “*Seminário Valorização dos Resíduos de Ardósia*” realizado em Papagaios-MG, abordando o estudo pioneiro sobre o uso de ardósia na indústria cimenteira e discutindo novas propostas de estudos e desenvolvimento tecnológico para o setor, com ênfase para uso como adição mineral em argamassa e concreto. O evento foi promovido pela Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM e pela Associação de Mineradores e Beneficiadores de Ardósia de Minas Gerais - AMAR-MG.

Para o desenvolvimento dessa pesquisa de doutorado, a brita de ardósia utilizada nos ensaios físicos e químicos foi fornecida em três oportunidades pela empresa Pevex Recicladora Ltda., localizada em Papagaios - MG, correspondendo a entregas de 400 kg, 500 kg e 1000 kg, respectivamente, a partir de fevereiro de 2015, totalizando 1900 kg de brita 1 de ardósia.

A escória de alto forno finamente moída, com índice granulométrico de linha correspondente a 99% passante na peneira 200 (0,075mm), foi adquirida da empresa Central Ibec Insumos Especiais, sediada no município de Matozinhos-MG (Anexo IV).

O cimento Portland utilizado foi o CP V ARI, um cimento Portland de Alta Resistência Inicial fabricado pela Holcim Brasil, adquirido de um distribuidor da fábrica em Pedro Leopoldo.

Os trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos na planta do CENTRO DE PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL – Grupo de Pesquisa Geoambiental, uma unidade de laboratórios de ensaios físicos e mecânicos pertencente à UFMG e sob a responsabilidade do Professor Abdias, localizada em Pedro Leopoldo-MG. Nesta planta, foram desenvolvidas atividades de preparação de amostras, como britagem e cominuição da ardósia, análise granulométrica, IAP, blaine, densidade aparente e real, e o desenvolvimento de ensaios para a determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de 50

mm de diâmetro e 100 mm de altura, de acordo com a norma técnica ABNT/NBR 7215/1996– Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1996).

Parte da moagem da brita de ardósia, totalizando 1,2 toneladas, foi realizada em moinho pendular na empresa Verdés (Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Felipe Verdés – CDTFV), localizada no município de Itu-SP. Do restante, 400kg foram moídos na planta em Pedro Leopoldo, em moinho de bolas de ferro fundido.

As análises químicas por Fluorescência de Raios X – FRX de amostras da rocha ardósia e da escória de alto forno foram realizadas no Centro de Caracterização de Minerais e Materiais– FRX Service Ltda., instalado no município de Santa Luzia - MG. Já as análises químicas por Fluorescência de Raios X – FRX para amostras da argamassa constituída da mistura ternária de cimento Portland, ardósia e escória foram realizadas na Phosther Tecnologia de Aglomerações Ltda, localizada em Santa Luzia – MG. Os ensaios de Difractometria de Raios-X foram desenvolvidos no laboratório do CEFET-MG (Campus 1) em Belo Horizonte – MG. Os ensaios para determinação de Área Superficial pelo método BET foram realizados na Phosther em Santa Luzia MG e a Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV foi realizada no Centro de Microscopia Eletrônica da UFMG em Belo Horizonte - MG e na empresa Phosther Tecnologia de Aglomerações Ltda.

### **3.2 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE ARDÓSIA**

A preparação das amostras de ardósia para o desenvolvimento dos ensaios estruturados pela pesquisa foi realizada no Centro de Produção Sustentável – Grupo de Pesquisa Geoambiental da UFMG, instalado no município de Pedro Leopoldo-MG.

A Figura 3.1 registra a vista externa e a Figura 3.2 uma vista parcial do interior deste Centro de Pesquisa da UFMG.



**Figura 3.1** - Vista externa do Centro de Produção Sustentável da UFMG.  
Fonte: dados do autor, 2014.



**Figura 3.2** - Vista parcial do Centro de Produção Sustentável da UFMG.  
Fonte: dados do autor, 2014.

A primeira remessa de brita de ardósia fornecida pela Pevex Recicladora em fevereiro de 2015, num total de 400 kg de brita nº 1 e nº 2, foi inicialmente britada num britador de mandíbulas, separada na peneira vibratória marca SOLOTEST e, em seguida, moída num moinho de bolas com capacidade para 150 kg, a seco (Figuras 3.3 a 3.6). Em cada batelada, com duração aproximada de 1 hora e 30 minutos, foram usados 75 kg de corpo moedor e 25 kg de brita de ardósia. O corpo moedor foi formado de 35 kg de bola maior ( $\varnothing$  50 mm), 20 kg de bola média ( $\varnothing$  30 mm) e 20 kg de bola menor ( $\varnothing$  20 mm).



**Figura 3.3** – Brita de ardósia usada nos experimentos da pesquisa.  
Fonte: dados do autor, 2015

Foi usado um britador de mandíbulas marca Furlan (Figura 3.4), modelo BM 2515 – CV 10, RPM 380, de 800kg, com o objetivo de reduzir a granulometria da brita de ardósia antes de direcioná-lo para o moinho, aumentando a eficiência do rendimento do moinho e, conseqüentemente, a eficiência do processo de cominuição da brita mais fina.



**Figura 3.4** – Britador de mandíbulas reduzindo a granulometria da brita de ardósia.  
Fonte: dados do autor, 2015

A Figura 3.5 a seguir mostra a peneira vibratória em operação, separando a brita de ardósia em três frações granulométricas, oriunda do britador de mandíbulas.



**Figura 3.5** – Peneira vibratória separando as frações granulométricas da brita de ardósia.  
Fonte: dados do autor, 2015

O moinho de bolas (Figura 3.6) utilizado para a cominuição da brita de ardósia no Centro de Produção Sustentável, com capacidade para 150 kg, foi fabricado em Contagem-MG, com diâmetro (D) de 800mm, comprimento (h) igual a 1.100mm, potência de 1,5 CV e 1:3 rpm. Esta brita foi reduzida para pó com granulometria passante na peneira 0,075mm



**Figura 3.6** – Moinho de bolas utilizado para a cominuição da brita de ardósia.  
Fonte: dados do autor, 2014

As bolas de ferro fundido (Figura 3.7) utilizadas no processo de moagem possuem dimensões de 20 mm, 25 mm, 30 mm e 50 mm. Durante as operações de cominuição, todas foram parte proporcional do corpo moedor visando a melhor eficácia no rendimento da operação.



**Figura 3.7** – Corpo moedor constituído de bolas de ferro fundido.  
Fonte: dados do autor, 2015

Na Figura 3.8 tem-se na imagem (A) a brita fina de ardósia selecionada na peneira vibratória e na imagem (B) a ardósia em pó preparada no moinho de bola no Centro de Produção Sustentável da UFMG, com 60% passante na peneira 200 (0,075mm).



**Figura 3.8** – Brita fina de ardósia (A) e Ardósia em pó (B)  
Fonte: dados do autor, 2015

### **3.3 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (ABNT/NBR 7215/1996)**

O método de ensaio normatizado pela NBR 7215/1996 especifica a determinação da resistência à compressão de cimento Portland aplicada a corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm.

Esta norma especifica que os corpos-de-prova devem ser confeccionados com argamassa composta de “*uma parte de cimento, três de areia normalizada, em massa, e com relação água/cimento de 0,48*” (ABNT, 1996). Essa pesquisa manteve as especificações ditadas pela norma para a elaboração da argamassa, repetindo em todas as dosagens o mesmo teor de areia e água, mas alterando o percentual de cimento na massa, substituindo-o pela adição de ardósia e de escória de alto forno.

Nos ensaios foram pesquisados, inicialmente, 14 misturas ternárias com dosagens diferentes de cimento Portland, escória de alto forno micronizada e ardósia micronizada (passante na peneira 0,075 mm). Destas 14 misturas, 5 misturas foram refeitas, totalizando 19 amostras. Após analisar os resultados de ruptura destas amostras iniciais, foram selecionadas duas dosagens que apresentaram os índices de resistência significativos e elaborados mais 11 ensaios de ruptura envolvendo estas dosagens, com ardósia e escória nas granulometrias passantes nas peneiras 0,075 mm e 0,044 mm.

Ao longo da pesquisa, para cada dosagem ou traço preestabelecido, foram moldados 6 corpos-de-prova, totalizando 30 traços e 180 corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, rompidos na idade de 14 dias e 28 dias, em consonância com a norma adotada.

### **3.3.1 Componentes da argamassa em estudo**

A determinação da resistência à compressão, com base nos ensaios prescritos pela norma técnica NBR 7215/1996, teve como meta substituir parte do cimento Portland da argamassa pela adição de ardósia e escória de alto forno, finamente moídas.

A areia empregada no ensaio, registrada nas imagens da Figura 3.9 a seguir, foi a “*Areia normal para ensaio de cimento*” elaborada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/SP) em consonância com a norma técnica NBR 7214/1982, correspondendo às classificações 16, 30, 50 e 100. O material tipificado como nº 16 refere-se à areia retida na peneira 1,2mm (fração grossa); o nº 30 à areia retida na peneira 0,6mm (fração média grossa); o nº 50 à areia retida na peneira 0,3mm (fração média fina); o número 100 à areia retida na peneira 0,15mm (fração fina). A massa de cada uma destas frações para



cada mistura da pesquisa pesaram  $468 \pm 0,3$  g, totalizando 1872 gramas de areia normal em cada mistura (Figura 3.9).



**Figura 3.9** - Areia Normal Brasileira desenvolvida pelo IPT (NBR 7214)  
Fonte: dados do autor, 2015

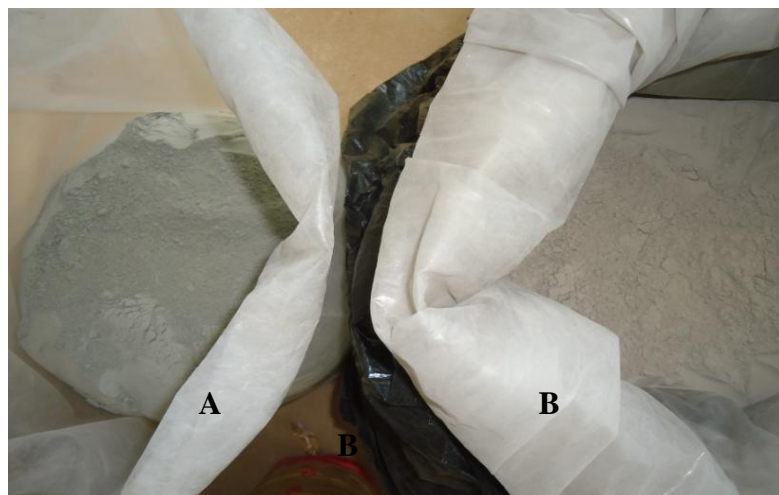
O cimento Portland utilizado nos ensaios foi o CP-V ARI, fabricado pela Holcim Brasil, de acordo com a norma técnica NBR 5733/1991. Por ser caracterizado pela sua alta resistência inicial, é indicado para artefatos, concreto e argamassa de pega rápida (Figura 3.10).



**Figura 3.10** - Cimento Portland CP-V usado nos experimentos da pesquisa.  
Fonte: dados do autor, 2015

A escória de alto forno, adquirida da empresa Central Ibec Insumos Especiais (Figura 3.11-B), apresenta índice granulométrico de linha correspondente a 99% passante na peneira 200 (0,075mm). Em uma segunda etapa dos ensaios, utilizou-se escória micronizada<sup>11</sup>, com granulometria de 95,6% passante na peneira 325 (0,044mm).

<sup>11</sup> Micronizar: reduzir a pó fino (Fonte – [www.dicionarioweb.com.br/micronizar](http://www.dicionarioweb.com.br/micronizar))



**Figura 3.11** –Ardósia moída em moinho pendular (A) e Escória de alto forno moída na Central Ibec (B).  
Fonte: dados do autor, 2015

O processamento da ardósia no moinho pendular na empresa Verdés (Figura 3.12) ocorreu em duas bateladas, nas datas de 10/04/2015 e 04/09/2015, respectivamente (Anexos V e VI). A primeira, totalizando 350 kg de entrada, apresentou índice granulométrico correspondente a 95% passante na peneira 200 mesh (0,075mm). A segunda batelada, totalizando 856 kg de entrada, obteve índice granulométrico de 98,6% passante na peneira 325 mesh (0,044mm). No moinho de bolas do Centro de Produção Sustentável, o passante na peneira 200 mesh (0,075mm) atingiu 60%.

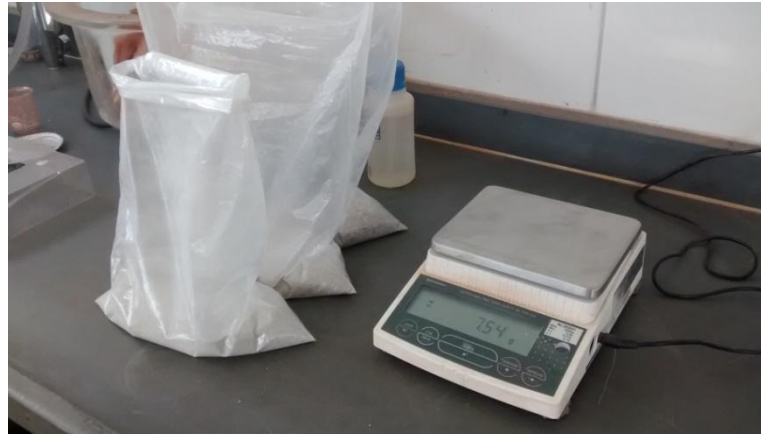


**Figura 3.12** – Ardósia processada em moinho pendular em Itu-SP.  
Fonte: dados do autor, 2015

A água usada na mistura da argamassa é fornecida pela rede de distribuição pública de Pedro Leopoldo-MG, captada em poço subterrâneo.

### 3.3.2 Equipamentos utilizados

Balança eletrônica marca SHIMADZU, modelo BL 3200H, máximo 3200g, mínimo 0,5g, d = 0,01g, e = 0,1g (Figura 3.13).



**Figura 3.13** -Balança eletrônica.  
Fonte: dados do autor, 2015/2016

Misturador mecânico – Argamassadeira elétrica, marca VIATEST, código VC 370, com motor de 3HP, com 2 velocidades sendo 140 rpm em baixa e 285 rpm em alta rotação, 1 cuba com capacidade de 5 litros, painel com display digital e comando temporizado (Figura 3.14).



**Figura 3.14** – Argamassadeira elétrica com comando temporizado.  
Fonte: dados do autor, 2015

Moldes metálicos, cilíndricos, com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, base rosqueada, de metal não corrosível, empregados para elaborar os corpos-de-prova de argamassa. (Figura 3.15).



**Figura 3.15** – Moldes metálicos com dimensões 50 x 100 mm, para elaboração de corpos-de-prova.  
Fonte: dados do autor, 2015

Soquete em material metálico não corrosivo, utilizado para aplicação de 30 golpes uniformes para o adensamento de cada camada de argamassa no interior do recipiente cilíndrico de moldagem (Figura 3.16).



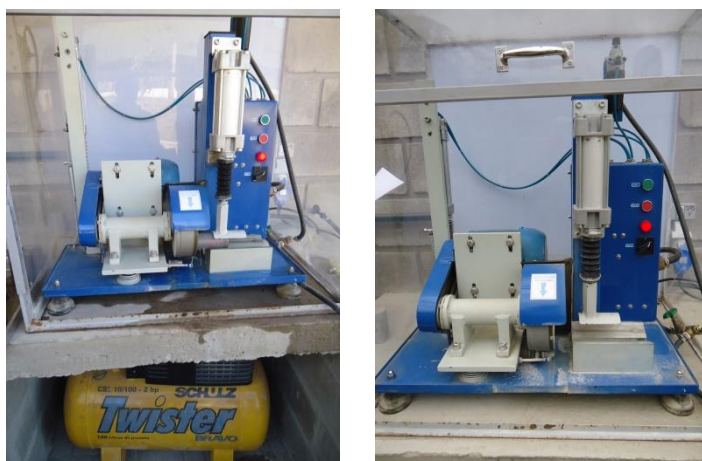
**Figura 3.16** – Soquete para adensamento da argamassa no molde cilíndrico.  
Fonte: dados do autor, 2015/2016

Caixa d'água empregada como tanque de água para manter os corpos-de-prova imersos em água não corrente, ao longo de 14 dias e/ou 28 dias até o rompimento na prensa hidráulica. Os corpos-de-prova foram desenformados após 24 horas da moldagem, identificados e imersos, separados entre si no reservatório de água, onde permaneceram até o momento do ensaio de ruptura (Figura 3.17).



**Figura 3.17** – Caixa d'água para imersão dos corpos-de-prova em água.  
Fonte: dados do autor, 2015

Aparelho retificador do topo e base do corpo de prova cilíndrico de argamassa e concreto de cimento, com disco diamantado, fixações pneumáticas, posicionador pneumático e proteção para o motor, marca Pavitest (Figura 3.18).



**Figura 3.18** – Aparelho retificador do corpo de prova.  
Fonte: dados do autor, 2015

Máquina de ensaio de compressão – prensa elétrica hidráulica usada nos ensaios de compressão e tração dos corpos-de-prova da pesquisa, com capacidade para 20 toneladas, marca Pavitest (Figura 3.19).



**Figura 3.19** – Prensa elétrica hidráulica para compressão dos CP  
 Fonte: dados do autor, 2015

### 3.3.3 Desenvolvimento do ensaio de ruptura

A norma técnica NBR 7215/96 define a seguinte quantidade de materiais, aqui referenciada como padrão, para a mistura da argamassa:

- Cimento Portland	624 ± 0,4 gramas
- Água	300 ± 0,2 ml
- Areia normal fração grossa	468 ± 0,3 gramas
- Areia normal fração média grossa	468 ± 0,3 gramas
- Areia normal fração média fina	468 ± 0,3 gramas
- Areia normal fração fina	468 ± 0,3 gramas

Esta mistura, constituída de 1.872 gramas de areia normal (75% da massa sólida total) e 624 gramas de cimento Portland (25% da massa sólida total), totalizando uma massa sólida total de 2.496 gramas de materiais, e 300 gramas de água, foi denominada na pesquisa como amostra padrão MB 01.

As dosagens propostas na pesquisa mantiveram a mesma quantidade de areia (1872g) e água (300ml) em todos os ensaios com as amostras MB 01 a MB 25 e alteraram a quantidade de cimento Portland. As 624 gramas de cimento (100% de cimento), definidas pela norma técnica, tiveram parte substituída nas proporções que variaram entre 20% a 60% desta massa total de cimento Portland. Isto é, nas misturas da

argamassa, a massa de 624 gramas de cimento variou entre 124,8 gramas a 374,4 gramas, equivalentes a 20% e 60%, respectivamente, da massa de cimento Portland estipulada pela norma técnica.

Em contra partida, as adições de ardósia e de escória de alto forno finamente moidas, completando a parte do cimento Portland substituído, compreenderam combinações nas quantidades que variaram de 62,4 gramas (10%) a 374,4 gramas (60%) da massa de cimento Portland estipulada pela norma técnica. Somadas a ardósia e a escória ao cimento, em cada ensaio, totalizaram as 624 gramas.

A Tabela 3.1 a seguir apresenta a relação das 14 primeiras misturas selecionadas para determinação da resistência à compressão, com granulometria da ardósia e da escória passantes na peneira 0,075mm (200 mesh), com base na NBR 7215/96.

**Tabela 3.1**– Relação das primeiras misturas para determinação da resistência à compressão

MOLDAGEM	TRAÇOS / COMPOSIÇÕES		
	Cimento CP-V (%)*	Ardósia Moída (%)*	Escória Moída (%)*
MB 01 (Padrão-NBR 7215/96)	100	-	-
MB 02	35	40	25
MB 03	20	40	40
MB 04	30	40	30
MB 05	35	30	35
MB 06	40	20	40
MB 07	40	30	30
MB 08	30	35	35
MB 09	30	30	40
MB 10	35	35	30
MB 11	40	40	20
MB 12	20	60	20
MB 13	20	20	60
MB 14	33,3	33,3	33,3

Fonte: dados do autor, 2015/2016

\*Os percentuais (%) atribuídos para os traços tem como referência o total de 624 gramas de cimento Portland definidos na norma técnica em questão.

Após os ensaios de resistência à compressão de cada uma destas misturas, acrescidas das amostras MB 15 a MB 19 realizadas para confirmação de resultados, definiu-se uma nova sequência de ensaios. Esta sequência foi formada pelas misturas com os melhores resultados de resistência à compressão, com base na NBR 7215/96, constituídas das seguintes composições: mistura composta de ardósia com granulometria passante na peneira 0,075 mm e escória com índices de linha (MB 20 e MB 21); mistura com ardósia passante na peneira 0,044 mm e escória com índices de linha (MB 22 e MB 23); mistura com ardósia e escória passantes na peneira 0,044 mm (MB 24 e MB 25), conforme apresentado na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** – Relação das misturas com os melhores resultados de resistência à compressão

MOLDAGEM	TRAÇOS / COMPOSIÇÕES		
	Cimento CP-V (%)*	Ardósia Moída (%)*	Escória Moída (%)*
<b>Ardósia passante na peneira 0,075 mm e Escória com índices granulométricos de linha (passante # 0,075mm)</b>			
MB 20	60	10	30
MB 21	60	20	20
<b>Ardósia passante na peneira 0,044 mm e Escória com índices granulométricos de linha (passante # 0,075mm)</b>			
MB 23	60	10	30
MB 22	60	20	20
<b>Ardósia passante na peneira 0,044 mm e Escória Micronizada (passante # 0,044mm)</b>			
MB 24	60	10	30
MB 25	60	20	20

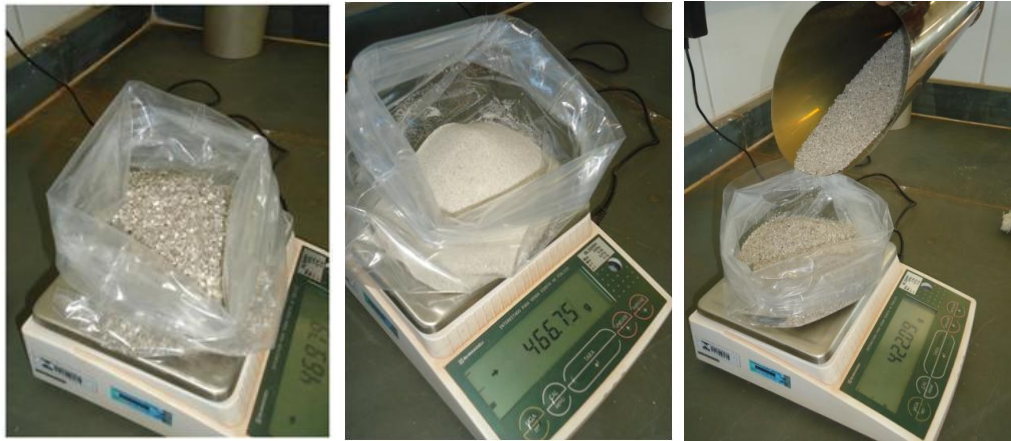
Fonte: dados do autor, 2015/2016

\*Os percentuais (%) atribuídos para os traços tem como referência o total de 624 gramas de cimento Portland definidos na norma técnica.

De forma sintética, os ensaios obedeceram os seguintes procedimentos, salientando que cada intervalo de tempo aqui descrito referente à mistura dos materiais foi controlado pelo temporizador automático da argamassadeira:



- pesagem de cada elemento da mistura de acordo com a quantidade definida para cada ensaio (Figura 3.20);



**Figura 3.20** – Balança eletrônica pesando cada fração da areia normal do IPT/SP.

Fonte: dados do autor, 2015/2016

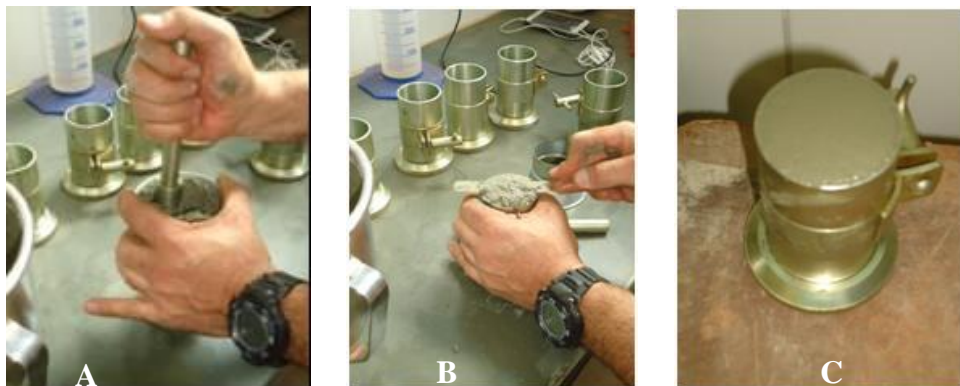
- adição de água na cuba da argamassadeira elétrica e, em seguida, em velocidade baixa durante 30 segundos, o cimento com ardósia e escória em pó, compondo esta mistura ternária. Após adicioná-los durante 30 segundos, obedecendo o percentual definido para cada amostra, foram introduzidas gradualmente, também durante o tempo de 30 segundos, as quatro frações da areia normal previamente misturadas. Após estes 60 segundos, ao finalizar a colocação da areia, mudou-se para velocidade alta, misturando os materiais na velocidade alta durante 30 segundos. Em seguida, o misturador desliga-se durante 1 minuto e 30 segundos. É quando, durante 15 segundos, raspa-se a cuba com a espátula para retirar a argamassa aderida na pá e na parede da cuba. No tempo restante de 1 minuto e 15 segundos, a cuba era coberta com um pano úmido para a argamassa ficar em repouso. Após este tempo, o temporizador da argamassadeira religava o misturador na velocidade alta durante mais 1 minuto, finalizando o processo de mistura mecânica. A Figura 3.21 ilustra as etapas relacionadas com a mistura dos componentes da argamassa em estudo;



**Figura 3.21** – Etapas relacionadas com a mistura dos componentes da argamassa em estudo

Fonte: dados do autor, 2015/2016

- introdução da argamassa no interior dos moldes cilíndricos, em quatro camadas aproximadamente semelhantes, usando espátula. Em cada camada foram deferidos 30 golpes uniformes usando um soquete metálico, sempre aplicados pelo autor, finalizando com a rasadura do topo do corpo-de-prova (Figura 3.22 A, B, C);



**Figura 3.22** – (A) Amassamento da argamassa no molde de corpo-de-prova. (B) Rasadura do topo com espátula. (C) Corpo-de-prova sendo preparado para o repouso de 24 horas antes do desmoldamento.

Fonte: dados do autor, 2015/2016

- após o adensamento provocado pelo amassamento da argamassa nos moldes cilíndricos, estes foram colocados em repouso por 24 horas (Figura 3.23);



**Figura 3.23** – Corpo-de-prova MB 22 pronto para a desmoldagem após o repouso de 24 horas.  
Fonte: dados do autor, 2015/2016

- em seguida a este período de repouso, os corpos-de-prova foram retirados dos moldes, identificados, e colocados imersos em água no tanque até a data da ruptura, totalizando 28 dias. Nesta pesquisa, foi direcionado rompê-los com 28 dias de idade, mas muitos corpos-de-prova foram rompidos, também, com 14 dias (Figura 3.24);



**Figura 3.24** – Corpos-de-prova desmoldados e preparados para a imersão na água durante 28 dias.  
Fonte: dados do autor, 2015/2016

- na Figura 3.25 a seguir tem-se 15 conjuntos compostos de 06 corpos-de-prova, num total de 90 peças, imersos em água no tanque;



**Figura 3.25** – Conjuntos de corpos-de-prova imersos em água.  
Fonte: dados do autor, 2015

- após cada período de imersão, momentos antes da ruptura na prensa hidráulica, os corpos-de-prova foram retificados no aparelho retificador para garantir total planicidade nas faces topo e base, visando não sofrer interferência negativa ao romper sobre a influência de alguma irregularidade morfológica no contato com os pratos da prensa hidráulica (Figura 3.26);



**Figura 3.26** – Retificação de corpo-de-prova antes da ruptura  
Fonte: dados do autor, 2015

- após a retificação, foram levados à prensa hidráulica para a determinação da carga de ruptura. Os corpos de prova eram colocados nos pratos da prensa, contendo neopreme na base e no topo, centrados em relação ao eixo de carregamento. Após cada ruptura, os pratos eram devidamente limpos. A Figura 3.27 apresenta as seguintes imagens: (A) corpo-de-prova MB 23 colocado na prensa para a

determinação da resistência a compressão; (B) prensa hidráulica rompendo o corpo-de-prova MB 23; (C) corpo-de-prova MB 23 logo após o seu rompimento na prensa.



**Figura 3.27** – (A) Detalhe do corpo-de-prova MB 23 na prensa. (B) Prensa hidráulica. (C) Corpo-de-prova após o seu rompimento

Fonte: dados do autor, 2016

- de cada batelada com seis corpos-de-prova, quatro foram rompidos, deixando dois para ensaios complementares, caso necessário. A resistência à compressão foi calculada em megapascal (MPa).

### 3.4 ENSAIOS QUÍMICOS DA ARDÓSIA E DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO

A análise química da amostra da rocha ardósia e da amostra de escória de alto forno por Fluorescência de Raios X foram realizados pela empresa FRX Service Ltda. - Centro de Caracterização de Minerais e Materiais, localizada no município de Santa Luzia– MG.

Foi encaminhada uma amostra de ardósia passante na peneira 0,044mm, utilizada em todos os experimentos da pesquisa e foram analisados os teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{ZrO}_2$ .

### 3.5 ENSAIOS DE ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS -X DAS ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE ARDÓSIA E ESCÓRIA

As análises de espectrometria de fluorescência de Raios-X indicando os óxidos em maior concentração nas amostras da mistura ternária constituída de cimento Portland, escória e ardósia, foram realizadas na Phosther, localizada em Santa Luzia-MG

Foi utilizado o equipamento modelo RAY NY EDX 720, da SHIMADZU para a realização da análise elementar semi-quantitativa dos óxidos, a qual foi realizada com vácuo (Figura 3.28).



**Figura 3.28** – Equipamento utilizado para análise de fluorescência de Raios-X.  
Fonte: dados do autor, 2016

A espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) é uma técnica analítica multi-elementar, e, em muitos casos, não destrutiva, que permite identificar os elementos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a proporção (concentração ou análise quantitativa) em que cada elemento se encontra presente na amostra, isto é, composição elementar das amostras (Oliveira, 2011; Gerwinski e Goetz, 1987).

Segundo Oliveira (2011), a radiação fluorescente pode ser analisada de duas formas: classificação das energias dos fótons (análise de energia dispersiva – EDS) ou separando os comprimentos de onda da radiação (análise de comprimento de onda dispersivo - WDS).

Esta metodologia está baseada na produção e detecção de raios X característicos emitidos pelos elementos constituintes da amostra quando irradiada com elétrons, íons, raios X ou gama com energias apropriadas. Além disso, a radiação secundária de elementos mais leves é relativamente de baixa energia, tem baixo poder de penetração e é severamente atenuada se o feixe passa através do ar em qualquer distância. Devido a isto, para análise de alto desempenho, o caminho da amostra ao detector pode ser mantido sob vácuo, reduzindo a atenuação dos raios X pelo meio e aumentando a sensibilidade da análise (Gerwinski e Goetz, 1987).

### **3.6 ENSAIOS DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X DO CIMENTO, ARDÓSIA E ESCÓRIA**

A análise de difratometria de raios-X foi realizada no laboratório da Engenharia de Materiais do CEFET-MG (campus 1), em Belo Horizonte-MG. Utilizou-se o Difrátômetro de Raio-X marca SHIMADZU, modelo XRD-7000 X-RAY DIFFRACTOMETER MAXIMA.X, retratado nas imagens da Figura 3.29 a seguir.



**Figura 3.29** – Difrátômetro de Raio-X instalado no CEFET-MG.  
Fonte: dados do autor, 2016

Esta análise teve como objetivo, identificar as fases mineralógicas presentes no cimento CP-V, na ardósia e escória de alto forno, ambas passantes nas peneiras 0,075mm e 0,044mm, respectivamente.

### 3.7 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREA SUPERFICIAL POR MÉTODO BET

O BET mede área superficial e porosidade. Nesta pesquisa, foi determinada apenas a área superficial.

Mourão (2013<sup>12</sup>) escreveu que o método de BET (Brunauer, Emmett, Teller) é uma teoria matemática, com o objetivo de descrever a adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida, e serve como base para uma técnica de análise importante para medição de área superficial específica de um material. É uma extensão a teoria de Langmuir e introduz o conceito de adsorção de multicamadas. A teoria de Langmuir relaciona a fisissorção de uma camada única de moléculas de gás, também chamadas de adsorbatos, sobre superfície sólida à pressão de gás do meio sob temperatura fixa.

Para esta análise preparou-se as amostras (aproximadamente 0,3 g cada amostra) por 4 horas a 300°C com vácuo, onde retira-se umidade da amostra e algumas impurezas que possam interferir na adsorção e dessorção de gás nitrogênio. Após esta preparação, as amostras foram transferidas para a estação de análise, onde foi utilizada uma isoterma de 40 pontos, sendo 20 pontos de adsorção e 20 pontos de dessorção de gás na amostra. Em seguida, foi determinada a área superficial específica através do volume de gás adsorvido fisicamente na superfície da amostra. O gás utilizado foi o nitrogênio.

Segundo o Professor Sidney Nicodemos (informação verbal<sup>13</sup>), como o tamanho das moléculas é muito pequeno, o gás pode adsorver em poros muito pequenos, formando uma monocamada adsorvida em toda a superfície exposta. É feito um tratamento, aquecendo e calculando esta área superficial por esta adsorção física (fisissorção). Forma-se uma monocamada de molécula de gás sobre toda a amostra e, em função do gás que foi adsorvido, sabe-se qual é a área superficial.

---

<sup>12</sup> Disponível <https://prezi.com/bj5khldlsw7h/determinacao-de-area-especifica-por-metodo-bet/>

<sup>13</sup> Informação verbal do Professor Dr. no curso de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, discutindo a metodologia de BET empregada na Phosther.



### 3.8 ENSAIOS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV

Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional, fornecendo rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida, mantendo a aparência tridimensional da imagem das amostras devido à grande profundidade de campo. (Dedavid, 2007)

Segundo Costa A. (2016), *“a técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV) refere-se à análise microestrutural por meio de imagens (fotomicrografia) reconstruídas eletronicamente de uma amostra determinada”*.

A análise microestrutural por meio de imagens das amostras de corpos de prova selecionadas foi obtida através dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada no Centro de Microscopia da UFMG e, também, na empresa Phosther Tecnologia de Aglomerações Ltda, localizada no município de Santa Luzia-MG.

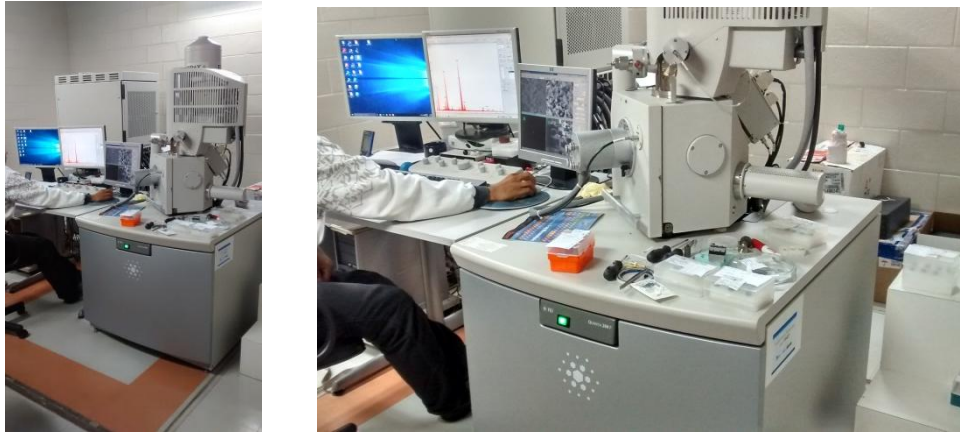
A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada na caracterização morfológica (SE - elétrons secundários) e no estudo da composição elementar (BSE - elétrons retro-espalhados). Na UFMG, foram geradas microfotografias da superfície de ruptura de cada amostra, obtida por MEV no modo SE (elétrons secundários) e BSE (elétrons retro-espalhados) e, na Phosther, foram geradas no modo SE (elétrons secundários), ambas com aumentos variando de 70x a 10.000x.

Separou-se uma amostra de fragmento dos corpos-de-prova MB 20, MB 21, MB 24, MB 25, P20-21 e P24-25. As amostras P20-21 e P24-25 são amostras padrões das misturas MB 20 e MB21, e MB24 e Mb25, respectivamente. Destes corpos-de-prova, foram preparadas uma seção polida de cada amostra, metalizada em carbono na UFMG e em platina na Phosther, para análise microestrutural por meio de imagem.

Estas amostras foram analisadas na UFMG no microscópio eletrônico de varredura, equipamento marca FEI/MEV, modelo Quanta FEG 200 F (Figura 3.30), pelo técnico Breno Barbosa Moreira. Na Phosther, foram analisadas pela Eng. Cristina Esteves, no

microscópio eletrônico de varredura da marca TESCAN (Figura 3.31), adotando metodologia Scanspead 8, Detector SE, com diâmetro do feixe de elétrons BeamIntensity 7 e distância da amostra ao detector no MEV de WD 12,0 mm.

Os espectrogramas da dispersão de energia (EDS) de cada amostra foram gerados no Centro de Microscopia da UFMG, mostrando a composição da matriz e do precipitado.



**Figura 3.30** – Microscópio eletrônico de varredura do Centro de Microscopia da UFMG  
Fonte: dados do autor, 2016



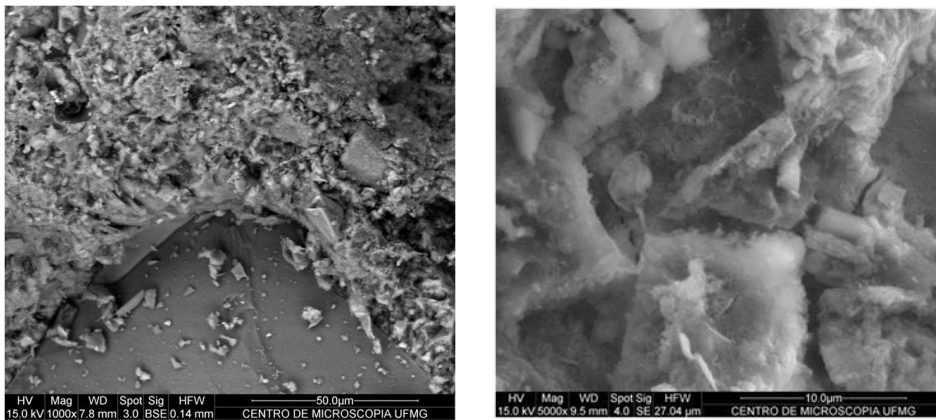
**Figura 3.31** – Microscópio eletrônico de varredura da empresa Phosther  
Fonte: dados do autor, 2016

As imagens retratadas nas Figuras 3.32 até Figura 3.34 a seguir visam ilustrar a preparação das amostras para observação pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) desenvolvida no Projeto e respectivos resultados apresentados no capítulo 4.6. Na figura 3.32, na imagem (a), tem-se um fragmento bruto obtido na ruptura do corpo de prova. Em (b) tem-se os fragmentos de corpos-de-prova preparados na forma de seção polida para a análise microestrutural eletrônica de varredura (MEV) na UFMG. A

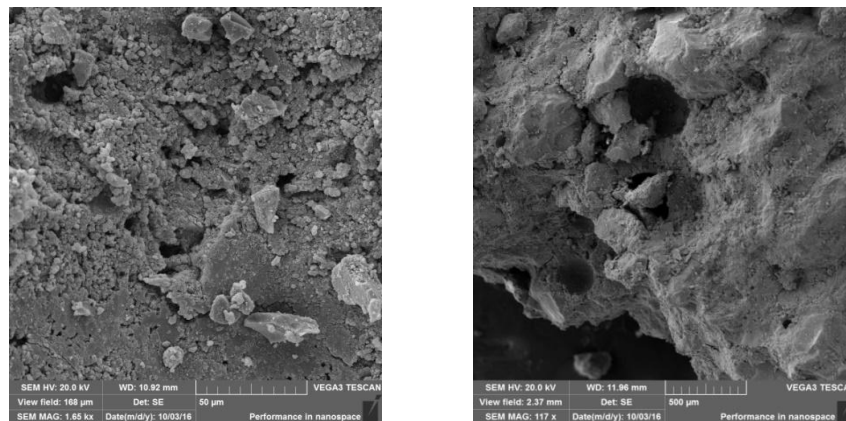
Figura 3.33 retrata microfotografias da superfície de ruptura da amostra obtida por MEV na UFMG, no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários), respectivamente. Na Figura 3.34 tem-se microfotografias da superfície de ruptura da amostra obtida por MEV na Phosther, no modo SE (elétrons secundários).



**Figura 3.32** – Amostras de fragmentos de corpos-de-prova preparadas para MEV na UFMG  
Fonte: dados do autor, 2016



**Figura 3.33** – Microfotografias da superfície de ruptura da amostra obtida por MEV na UFMG..  
Fonte: dados do autor, 2016



**Figura 3.34** – Microfotografias da superfície de ruptura da amostra obtida por MEV na Phosther.  
Fonte: dados do autor, 2016

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ENSAIOS DE RUPTURA

Analisando os resultados dos primeiros ensaios com as amostras MB 01 a MB 14 apresentados na Tabela 4.1 a seguir, observou-se que, à medida que diminuiu o teor de cimento na mistura, diminuiu o índice de resistência à ruptura. Da mesma forma, este fato se repetiu ao aumentar o teor de ardósia e diminuir o teor de escória na mesma mistura. O resultado observado foi, também, a diminuição do índice de resistência à ruptura. A Tabela 4.1 ilustra esta análise e os respectivos resultados.

**Tabela 4.1** – Resultados dos primeiros 14 ensaios de resistência à ruptura.

MOLDAGEM	TRAÇOS / COMPOSIÇÕES			RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)
	Cimento CP-V (%)	Ardósia Moída (%)	Escória Moída (%)	
MB 01 (Padrão)	100	-	-	55,90
MB 02	35	40	25	22,47
MB 03	20	40	40	15,67
MB 04	30	40	30	20,58
MB 05	35	30	35	29,54
MB 06	40	20	40	32,71
MB 07	40	30	30	29,68
MB 08	30	35	35	20,61
MB 09	30	30	40	22,02
MB 10	35	35	30	23,87
MB 11	40	40	20	24,84
MB 12	20	60	20	10,32
MB 13	20	20	60	15,07
MB 14	33,3	33,3	33,3	20,24

Fonte: dados do autor, 2015

Confirmada esta tendência de baixa resistência à ruptura descrita acima, elaborou-se uma segunda sequência de misturas, representada pelas amostras MB 20 a MB 25, as quais obtiveram resultados superiores de resistência. A Tabela 4.2 a seguir apresenta os traços/composições destas misturas com idade de 28 dias, a granulometria dos componentes das misturas e os respectivos índices de resistência à ruptura. Em todas elas, fixou-se a quantidade de cimento Portland em 374,4g, correspondendo a 60% das 624g normatizadas pela NBR 7215/96, norma referência da pesquisa, e variou a quantidade de ardósia e escória no limite de 40%.

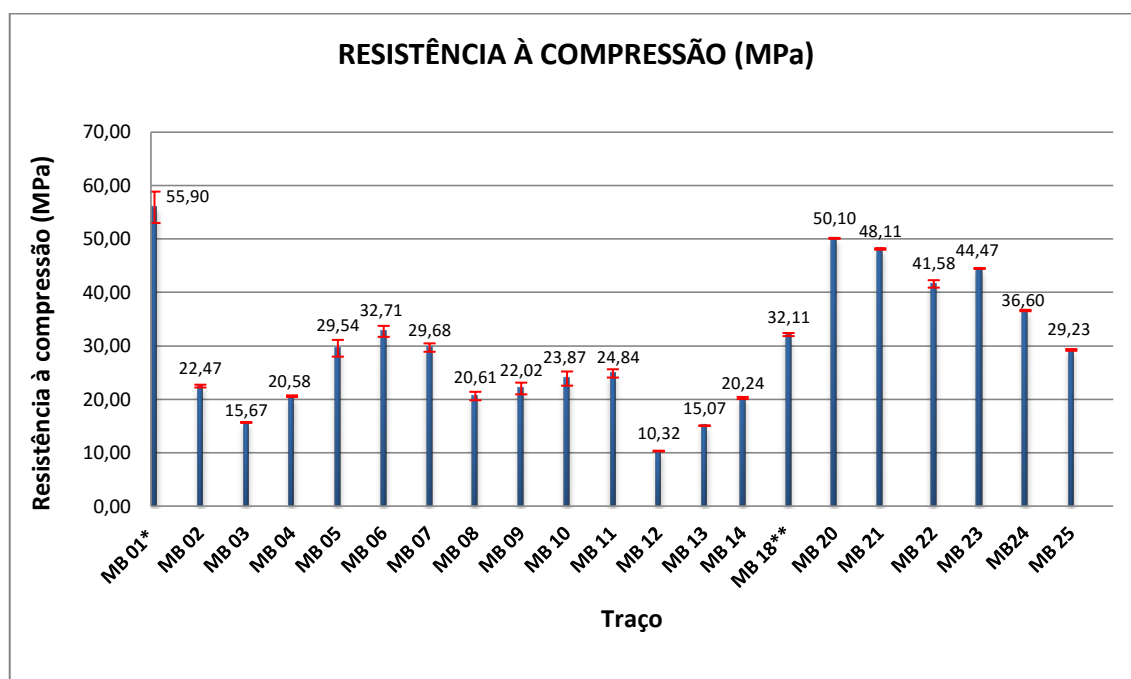
**Tabela 4.2** – Resultados da resistência à compressão dos corpos-de-prova MB 20 a MB 25 (28 dias)

MOLDAGEM AMOSTRA	TRAÇOS / COMPOSIÇÕES			Resistência à Compressão (MPa)
	Cimento CP-V (%)*	Ardósia Moída (%)*	Escória Moída (%)*	
<b>1- Ardósia passante na peneira 0,075 mm e Escória com índices granulométricos de linha (passante # 0,075mm)</b>				
MB-20	60	10	30	50,10
MB-21	60	20	20	48,11
<b>2- Ardósia passante na peneira 0,044 mm e Escória com índices granulométricos de linha (passante # 0,075mm)</b>				
MB-23	60	10	30	44,47
MB-22	60	20	20	41,58
<b>3- Ardósia passante na peneira 0,044 mm e Escória Micronizada (passante # 0,044mm)</b>				
MB-24	60	10	30	36,60
MB-25	60	20	20	29,23

Fonte: dados do autor, 2015/2016

A Figura 4.1 a seguir, comparando os valores médios das resistências à ruptura de cada corpo-de-prova analisado, mostra que o menor índice ocorreu com a amostra MB-12, cuja dosagem foi: 20% cimento, 20% escória e 60% ardósia. A resistência média à compressão desta amostra registrou 10,32 MPa.

Em seguida, as amostras MB-13 e MB-03 registraram índices de 15,07 MPa e 15,67 MPa, respectivamente. A MB-13 foi composta de 20% de cimento, 60% de escória e 20% de ardósia. A amostra MB-03, correspondeu à mistura composta de 20% de cimento, 40% de escória e 40% de ardósia (Tabela 4.1; Figura 4.1).



**Figura 4.1** – Gráfico apresentando os índices de resistência das amostras ensaiadas (28 dias)

Fonte: dados do autor, 2015/2016

\* MB 01 - Amostra padrão elaborada conforme a norma NBR 7215/96.

\*\* MB 18 - Amostra composta de 50% de cimento, 20% de ardósia, 20% de escória e 10% de cal hidratada.

Os resultados apresentados na Tabela 4.2 e na Figura 4.1, confirmaram que os índices maiores de resistência à ruptura para amostras com idade de 28 dias estão relacionados com o maior teor de cimento e escória (MB 20) e, também, com a maior granulometria dos compostos. Os materiais mais finos (MB 24 e MB 25) registraram índices menores de resistência à compressão quando comparados com a MB 20 e MB 21.

O maior índice de resistência, correspondendo a 50,10 MPa (Tabela 4.2), foi registrado pela amostra MB-20, composta de 10% de ardósia moída com granulometria passante

na peneira 0,075mm (200 mesh), 60% de cimento Portland e 30% de escória de alto forno com granulometria fornecida pela Central Ibec (granulometria de linha) correspondendo a 99% passante na peneira 0,075 (200 mesh).

Em segundo lugar, muito próximo do índice da MB 20, tem-se a amostra MB-21, rompida com 48,11 MPa, composta com 20% de ardósia, 60% de cimento Portland e 20% de escória com a mesma granulometria da MB-20.

A Tabela 4.3 compara o índice obtido na ruptura do corpo-de-prova MB 01 (55,90 MPa), definido como sendo o traço da argamassa padrão nesta pesquisa, com os índices de ruptura das misturas MB-20 a MB-25, respectivamente.

**Tabela 4.3** – Dados comparativos entre os resultados da resistência à compressão dos corpos-de-prova

<b>Amostra</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Equivalência ao Padrão (%)</b>
MB 01 - Padrão	55,90	2,93	100,0
MB 20	50,10	0,09	89,6
MB 21	48,11	0,15	86,1
MB 23	44,47	0,05	75,6
MB 22	41,58	0,69	74,4
MB 24	36,60	0,13	65,5
MB 25	29,23	0,16	52,3

Fonte: dados do autor, 2015/2016

Desta comparação tem-se que o corpo-de-prova MB 20 equivale a 89,6% da resistência do corpo-de-prova padrão (MB 01), isto é, aproximadamente 90,0% da resistência da mistura padrão. E, da mesma forma, o índice de resistência à compressão do corpo-de-prova MB 21 (48,11 MPa) equivale a 86,1 % da resistência da mistura padrão MB 01.

As amostras MB 23 e MB 22, com granulometria de referencia da ardósia passante na peneira 0,044mm (325 mesh) e escória com granulometria de linha (200 mesh), obtiveram índices intermediários de 44,47 MPa e 41,58 MPa, respectivamente. A MB 23 equivale a 75,6% e a MB 22 equivale a 74,4% da mistura padrão, respectivamente.

As amostras MB 24 e MB 25, com granulometria mais fina (ardósia e escória passante na peneira 0,044) registraram os menores índices de ruptura desta segunda sequência de misturas, correspondendo a 36,60 MPa e 29,23 MPa, respectivamente. A MB 24 equivale a 65,5% e a MB 25 equivale a 52,3% da mistura padrão MB 01, respectivamente.

Assim, a argamassa composta da mistura ternária de cimento Portland, ardósia e escória de alto forno desenvolvida nesta pesquisa, com idade de 28 dias, resultou como o melhor índice de resistência à compressão a ruptura do corpo-de-prova MB 20 e logo a seguir, em segundo lugar, a ruptura do corpo-de-prova MB 21, ambas com granulometria da ardósia e escória (granulometria de linha) passante na peneira 0,075mm.

A amostra MB 18 utilizou 10% de cal hidratada na mistura, sendo composta por 50% de cimento, 20% de escória, 20% de ardósia e 10% de cal hidratada. Observou-se que a substituição de 10% do cimento pela adição de 10% de cal hidratada, mantendo a mesma relação de 20% de ardósia e 20% de escória, gerou um resultado inferior ao comparar com o resultado da ruptura da MB 21 (60% de cimento, 20% de ardósia e 20% de escória). O índice médio de ruptura do corpo-de-prova MB 18 atingiu 32,11 MPa, equivalente a 57,44% da resistência da mistura padrão, enquanto a MB 21 atingiu 48,11 MPa (86,1 %).

A magnitude desses resultados obtidos nos ensaios de ruptura dos corpos de prova foram importantes na pesquisa, mas esperava-se que as amostras ternárias com ardósia e escória na granulometria mais fina apresentassem maior resistência à compressão. Afinal, isto foi preconizado nas referências bibliográficas adotadas nesta pesquisa, que previam o maior preenchimento dos poros vazios pelo material mais fino. Mas, foram das amostras MB 20 e MB 21, com granulometria passante na peneira 0,075mm, os melhores resultados de resistência à ruptura por compressão.



Cita-se Castro e Pandolfelli (2009) que, estudando empacotamento das partículas, concluíram que, nas adições minerais, componentes finos e ultrafinos, com formato esférico, têm sido adicionados às misturas tanto para facilitar o auto-adensamento quanto para garantir uma melhor compactação e preenchimento dos vazios existentes entre os grãos, aumentando ainda mais a densidade desses materiais.

O detalhamento desses resultados de resistência à ruptura serão discutidos no final do capítulo, quando a microscopia eletrônica e outros parâmetros físicos e químicos tiverem sido apresentados.

A Figura 4.2 mostra o aspecto das fraturas de alguns corpos-de-prova após o rompimento na prensa hidráulica, possibilitando analisar as formas resultantes de cada peça cilíndrica da argamassa com adição de ardósia e escória. A última imagem, posicionada no lado direito da porção inferior do arranjo das amostras, refere-se a uma amostra padrão, sem adição de ardósia e escória.



**Figura 4.2** – Morfologia de corpos-de-prova resultantes da ruptura na prensa hidráulica.

Fonte: dados do autor, 2015

## 4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ARDÓSIA E DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO

Os ensaios químicos foram realizados em amostras de ardósia, com granulometria passante na peneira 0,044 mm, extraída em lavras localizadas no município de Papagaios – MG, e em amostras de escória de alto forno passante na peneira 0,075 mm, fornecida pela empresa Central IBEC, localizada no município de Matozinhos – MG. Os resultados encontram-se expostos na Tabela 4.4 a seguir.

**Tabela 4.4** - Composição química da ardósia e da escória utilizadas na pesquisa.

	ÓXIDOS (%)											
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	ZrO <sub>2</sub>
<b>Ardósia (# 325)</b>	15,51	60,52	0,79	7,92	0,01	0,11	1,95	3,01	0,18	3,75	1,82	< 0,01
<b>Escória (#200)</b>	11,73	42,73	0,48	5,12	0,02	1,56	32,73	4,09	0,04	0,99	0,11	NR
Fluorescência de Raios X												

Fonte: dados do autor, 2015/2016

No resultado da análise química da ardósia, destacam-se o SiO<sub>2</sub>, presente em maior percentual (60,52%), seguido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15,51%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7,92%), K<sub>2</sub>O (3,75%) e MgO (3,01 %). O CaO (1,95%) e o Na<sub>2</sub>O (1,82%) completam a relação de elementos importantes na mistura (Anexo I).

No resultado da análise química da escória, tem-se o SiO<sub>2</sub> em maior teor (42,73%), seguido do CaO (32,73%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11,73). Em menor percentual, tem-se o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5,12%) e o MgO (4,09 %)

Observa-se que o maior teor de CaO (32,73%) foi registrado na composição química da escória, enquanto na ardósia atingiu 1,95%. O Ca é um elemento importante na constituição das quatro principais fases sólidas na pasta de cimento hidratada.

### **4.3 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X DAS ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE ARDÓSIA E ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

A FRX foi utilizada para identificar os óxidos ou elementos químicos presentes em fragmentos (cacos) das amostras das argamassas em estudo (análise qualitativa) e levantar as suas concentrações em cada fragmento analisado (análise semi-quantitativa). Não foram construídas curvas de calibração para uma análise quantitativa de maior acurácia.

A Tabela 4.5 a seguir apresenta os resultados de identificação e quantificação dos principais óxidos detectados na FRX no equipamento modelo EDX 720, marca Shimadzu. Optou-se pela análise de óxidos dos fragmentos das amostras das argamassas em estudo nesta pesquisa (no tempo de 14 dias de processamento) para comparação com fragmento da amostra padrão estabelecida pela norma NBR 7215/96. A relação completa com os dados experimentais para comparações e análises dos óxidos e suas concentrações considerando os vários traços ou amostras encontra-se no Anexo II desta tese.

Cada análise foi desenvolvida em triplicata por amostras utilizando o detector EDX (*Energy Dispersive X-ray Fluorescence*), tendo sido feitas varreduras em pontos distintos de uma mesma amostra. Daí a variação nas concentrações dos elementos químicos ou óxidos na mesma amostra evidenciam talvez que, em algumas regiões, reações químicas da hidratação ou aglomeração da pasta cimento podem ter ocorrido de forma mais intensas do que em outros pontos, resultando em maior ou menor concentração de determinados elementos químicos presentes nas fases cristalinas formadas ou ali distribuídas na matriz cimentícia.

**Tabela 4.5 - Relação dos óxidos presentes nas amostras das argamassas com idade de 14 dias.**

AMOSTRA	ÓXIDOS (%)											
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	SrO	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO	CuO	ZnO
PADRÃO 0,075 mm 14 dias	54,62	37,11		2,90	3,13	1,28	0,41	0,28	0,16	0,06	0,03	
PADRÃO 0,075 mm 14 dias	88,18	6,15		3,52	0,67	0,22	0,42	0,24	0,08	0,09		0,26
PADRÃO 0,075 mm 14 dias	53,44	39,15		2,65	2,59	1,11	0,37	0,38	0,05	0,07		0,03
PADRÃO 0,075 mm 14 dias	83,77	10,34		3,52	0,87	0,13	0,38	0,46	0,04	0,11		0,27
PADRÃO 0,075 mm 14 dias	49,21	43,88		2,10	2,90	1,11	0,30	0,21	0,04	0,07	0,04	0,2
PADRÃO 0,075 mm 14 dias	41,63	51,68		1,93	1,67	2,13	0,28	0,19	0,05	0,07	0,02	0,06
PADRÃO 0,075 mm 14 dias	57,05	34,45		3,53	2,17	1,88	0,36	0,27	0,05	0,08	0,03	0,04
MB20 0,075 mm 14 dias	50,10	40,33		4,24	2,19	1,35	0,30	0,68	0,08	0,53		0,06
MB20 0,075 mm 14 dias	90,99			6,52			0,92	0,43	0,12	0,79		0,11
MB20 0,075 mm 14 dias	16,97	59,90	16,17	1,31	1,57	3,05	0,06	0,23	0,05	0,03		0,02
MB21 0,075 mm	36,33	56,46		3,30	1,22	1,44	0,19	0,48	0,06	0,25	0,08	0,05
MB21 0,075 mm 14 dias	51,61	38,10		4,86	2,16	1,74	0,31	0,72	0,07	0,40	0,05	
MB21 0,075 mm 14 dias	32,61	59,35		2,57	4,45		0,19	0,38	0,05	0,20		
MB21 0,075 mm 14 dias	48,35	42,03		4,73	2,24	1,11	0,33	0,49	0,10	0,40		0,04

Fonte: dados do autor, 2016

Como era esperado, na Tabela 4.5 os óxidos CaO e SiO<sub>2</sub> ocorreram majoritariamente em concentrações sensíveis em todas as amostras analisadas, seguidos minoritariamente do Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> detectado em apenas uma das amostras analisada, e ainda traços de óxidos de outros elementos

A Tabela 4.6 a seguir apresenta os resultados de uma análise após 28 dias do processamento dos corpos de prova (amostras fraturadas após ensaio mecânico), com identificação e quantificação dos principais óxidos detectados na FRX no equipamento modelo EDX 720, marca Shimadzu.

**Tabela 4.6** - Relação dos óxidos presentes nas amostras das argamassas com idade de 28 dias.

AMOSTRA	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	SrO	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO	CuO	ZnO
PADRÃO 0,044 mm 28 dias	39,18	52,35		2,05	4,64	0,90	0,30	0,27	0,09	0,05		0,06
PADRÃO 0,044 mm 28 dias	40,55	52,04		2,28	3,89	0,26	0,30	0,39	0,07	0,06	0,06	0,04
MB24 0,044 mm 28 dias	36,54	53,11		5,17	3,29	0,62	0,22	0,58	0,11	0,11		0,05
MB24 0,044 mm 28 dias	55,26	31,52		6,58	3,16	1,67	0,42	0,82	0,23	0,15	0,04	
MB24 0,044 mm 28 dias	49,38	42,15		3,98	2,14	0,89	0,43	0,66	0,15	0,08	0,09	0,03
MB24 0,044 mm 28 dias	52,35	34,38		6,70	2,21	2,52	0,35	1,00	0,24	0,14		0,03
MB24 0,044 mm 28 dias	45,57	41,03		5,79	3,80	1,62	0,39	1,24	0,28	0,16		0,04
MB25 0,044 mm 28 dias	43,79	43,79		4,89	3,97	1,89	0,26	0,93	0,23	0,13	0,04	0,04
MB25 0,044 mm 28 dias	36,82	51,55		4,91	3,08	1,34	0,32	1,03	0,19	0,14	0,43	0,10

Fonte: dados do autor, 2016

Como também foi observado, nesta Tabela 4.6 os óxidos CaO e SiO<sub>2</sub> foram majoritários em todas as amostras analisadas. Não foram detectados quaisquer traços de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Evidenciou-se, como anteriormente mostrados, a presença minoritária de Fe, K e S oriundos das matérias-primas utilizadas, além de traços de outros elementos químicos.

Observou-se que as amostras Padrão passante na peneira 0,075 mm tem predomínio de maior concentração de Ca do que o percentual observado de Si. As duas amostras Padrão 0,044 mm, ao contrário, possuem concentração maior de Si sobre o Ca, que demonstra que o peneiramento pode produzir uma segregação de espécies químicas que formaram os microconstituintes das misturas. As amostras MB 20 e MB 21, com granulometria 0,075 mm, registraram variações das concentrações do Ca e do Si alternando entre elas as razões estequiométricas desses dois elementos. Já na amostra MB 24, com granulometria mais fina, observou-se predomínio da concentração do Ca sobre o Si. Apenas uma amostra registrou maior concentração de Si frente ao Ca. Os resultados da FRX das duas amostras MB 25 não foram suficientes para determinar a tendência de modificações nas concentrações de Ca e de Si, bem como dos demais óxidos identificados.

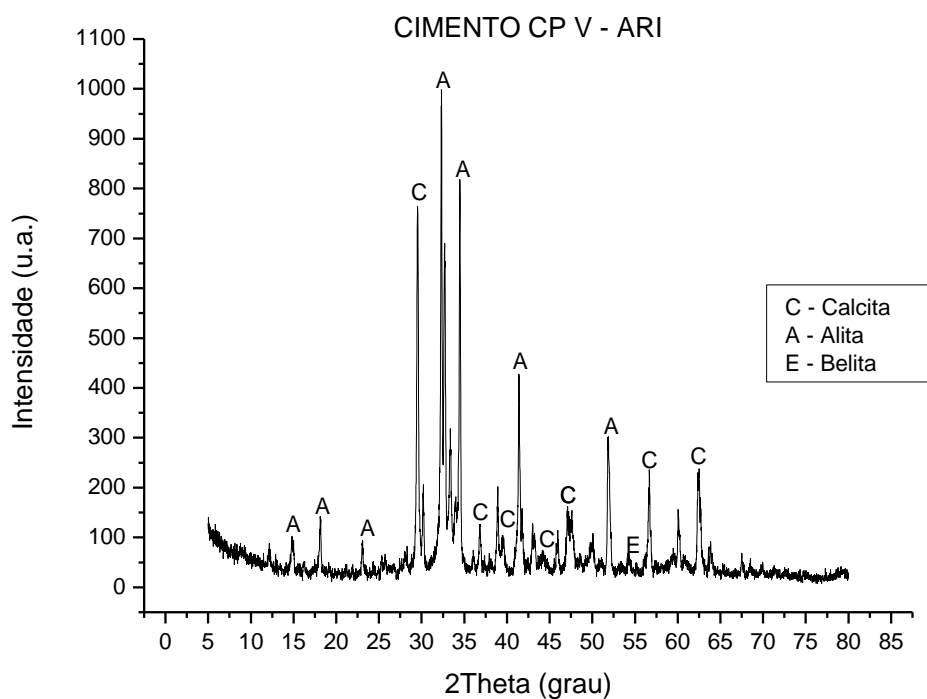
É possível intuir como resultados das observações de FRX os resultados esperados, mostrados a seguir, das fases cristalinas ou fase amorfa encontradas nas análises de difração de raio-X (DRX), pois cada fase cristalina é oriunda de um balanço de massa onde se distribuem os elementos químicos ou óxidos. Como esperado, o tempo de preparação com o cimento CPV ARI parece afetar a predominância dos elementos ou óxidos que formam as fases cristalinas e portanto a microestrutura das amostras, o que será discutido mais a frente neste trabalho.

#### **4.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X**

Os resultados das análises de difração de raio-X (DRX) mostradas a seguir foram extraídos dos corpos-de-prova (CPs) das diversas composições das argamassas estudadas, devidamente cominuídos (britagem e moagem) e transformados em pó. As amostras pulverizadas foram submetidas à análise de DRX para identificação das fases cristalinas presentes no material, sendo observado a existência de uma fase amorfa, as quais serão apresentadas nos difratogramas de raios-X a seguir.

Foram analisadas amostras do cimento CP-V ARI, utilizado em todos os experimentos, da ardósia e da escória passantes nas peneiras 0,075 mm e 0,044 mm, das amostras da argamassa MB 24 e MB 25, e da argamassa padrão definida pela norma técnica NBR 7215/1996. As amostras MB 24 e MB 25 foram elaboradas com adição da ardósia e da escória de alto forno em proporções variadas, micronizadas, substituindo 40% do cimento total definido na referida norma técnica.

A Figura 4.3 mostra o Difratoograma de Raios X (DRX) da amostra de cimento Portland CP V ARI usado nos experimentos da pesquisa.



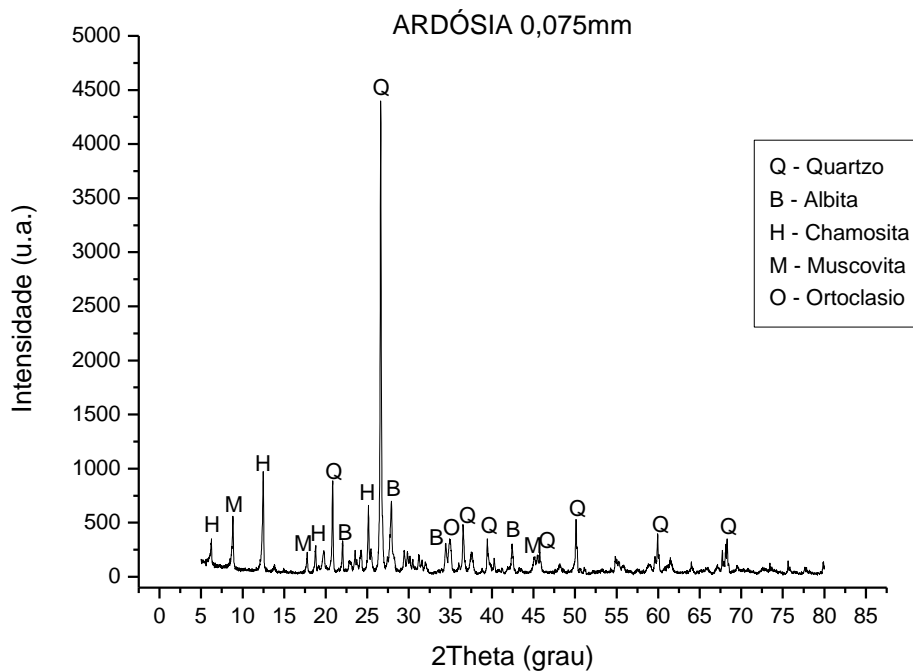
**Figura 4.3** - Difratoograma de Raios X da amostra de cimento CP V.  
Fonte: dados do autor, 2016

Através do DRX (Figura 4.3), foram identificados no cimento CP V a presença majoritária da alita e da calcita, e em menor quantidade a belita. Essas três fases do cimento são importantes na definição das propriedades mecânicas das amostras

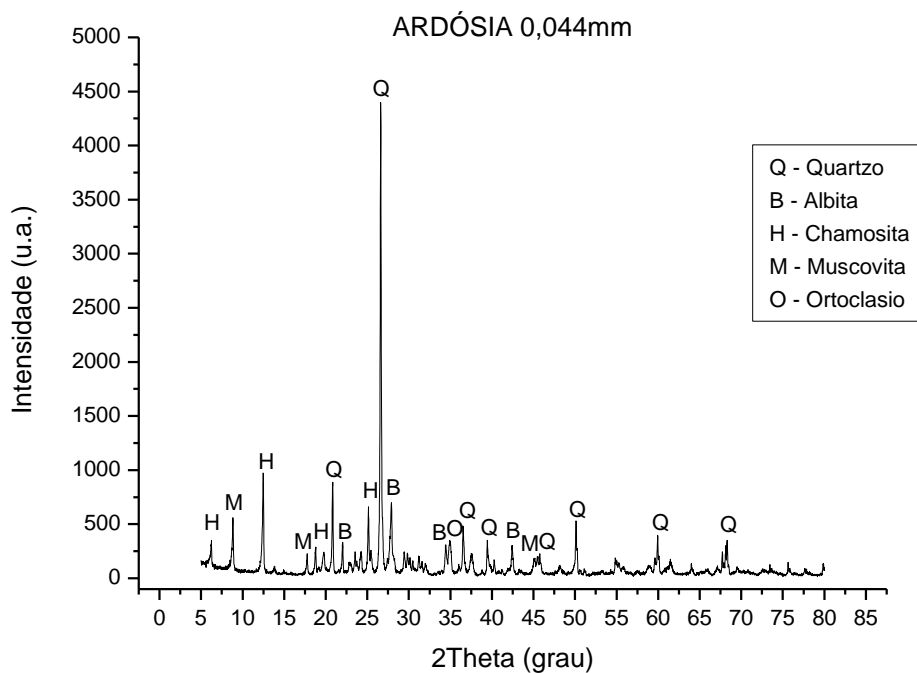


processadas, em especial à concentração de alita (silicato tricálcico  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , ou C3S). Estas fases estão intrinsecamente relacionadas à composição química dos produtos obtidos da hidratação do cimento. No processo de obtenção do cimento, o clínquer deve ser resfriado rapidamente, para evitar a decomposição da alita em belita (silicato dicálcico;  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , ou C2S) e ou cal (CaO).

A Figura 4.4 e Figura 4.5 mostram os DRXs da fração das amostras de ardósia com granulometria passante na peneira 0,075 mm e 0,044 mm, respectivamente.



**Figura 4.4** - Difratograma da fração da amostra de ardósia passante na peneira 0,075 mm  
Fonte: dados do autor, 2016



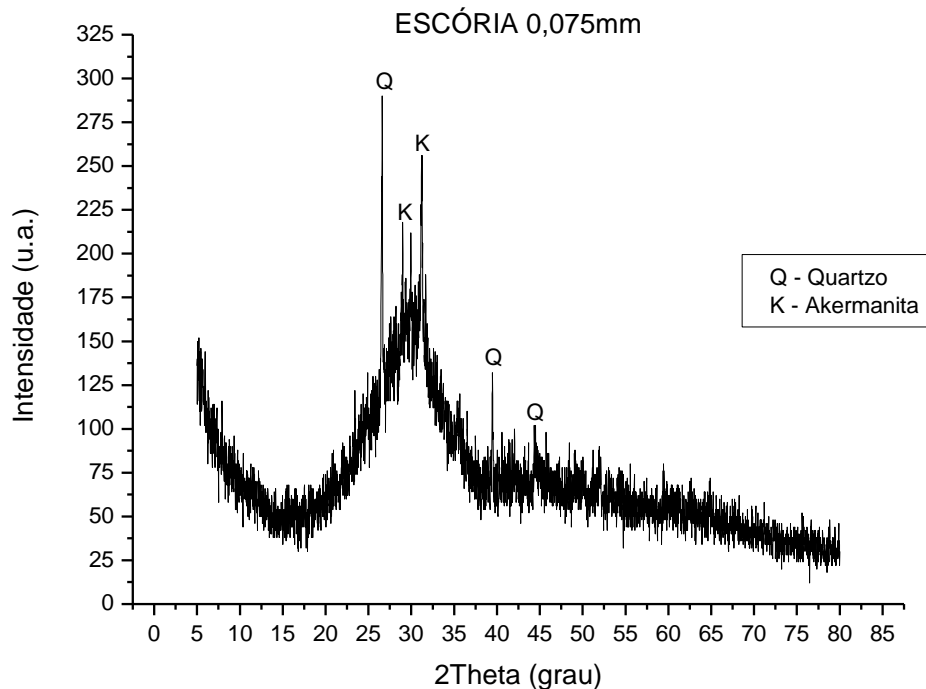
**Figura 4.5** - Difratograma da fração da amostra de ardósia passante na peneira 0,044 mm.  
Fonte: dados do autor, 2016

Para a ardósia, levantou-se a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), chamosita, muscovita e ortoclásio, sendo os maiores picos nos difratômetros registrados para o quartzo, seguido da chamosita e albita. Essa composição mineralógica nas granulometrias passantes nas peneiras 0,075 mm e 0,044 mm e os picos de intensidade não diferem entre si, conforme pode ser visto na Figura 4.4 e Figura 4.5.

O mineral chamosita (ou chamoisita) é um silicato básico de magnésio e ferro –  $(\text{Mg}, \text{Fe})_3, \text{Fe}^{3+}_3 (\text{AlSi}_3)\text{O}_{10} (\text{OH})_8$ , monoclinico, pertencente ao grupo das cloritas e forma uma série com o mineral clinocloro. Chamosita é rica em ferro e o clinocloro é o membro final rico em magnésio. Possuem propriedades semelhantes, sendo difícil de identificar um do outro (Branco, 1982; Dana, 1969).

Clinocloro, chamosita e pennantita são as variáveis mais comuns neste grupo da clorita, presentes em rochas metamórficas de baixa e média temperatura. A ardósia é produto de metamorfismo de baixo grau (baixa temperatura) e foi um importante agregado utilizados neste estudo.

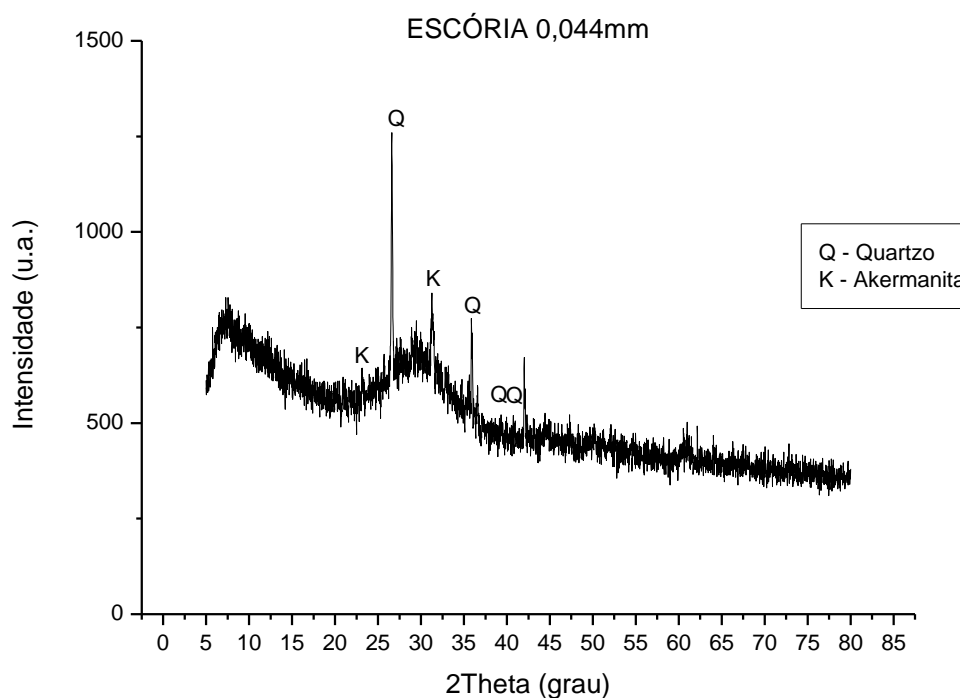
As Figuras 4.6 e 4.7 mostram os DRXs do resíduo siderúrgico utilizado neste estudo, a escória de alto forno passante na peneira 0,075 mm e 0,044mm, respectivamente, evidenciando sua elevada amorficidade.



**Figura 4.6** - Difratograma da fração da escória de alto forno evidenciando o seu estado amorfo.  
Fonte: dados do autor, 2016

Nos difratogramas da escória de alto forno utilizada nos experimentos detectou-se a presença dos minerais quartzo e akermanita. A akermanita ocorre em algumas escórias, é um silicato de cálcio e magnésio, com fórmula química  $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ , tetragonal, isomórfica com a gehienita e melilita. Apresenta-se como cristais prismáticos tendendo para cristais tabulares finos. Foi descrito pela primeira vez pelo mineralogista sueco Richard Akerman a partir de amostra de escória da produção de ferro em forno na Suécia (Ferreira, 1980; Branco, 1982).

Os difratogramas da fração escória de alto forno, ilustrados nas Figuras 4.6 e 4.7, confirmam o estado amorfo das amostras utilizadas, caracterizando ter sido originada no processo de resfriamento rápido. A escória no estado amorfo, isto é, com estrutura vítrea, apresenta propriedades cimentícias quando finamente moída.



**Figura 4.7** - Difratograma da fração da escória de alto forno evidenciando o seu estado amorfo.  
Fonte: dados do autor, 2016

Em ambos os difratogramas da escória de alto forno utilizada nos experimentos detectou-se a presença majoritária de uma fase amorfa possivelmente sílica amorfa, além de traços de dois minerais, o quartzo ( $\text{SiO}_2$  ou sílica cristalina) e a akermanita ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ). A literatura reporta que além da sílica amorfa e do quartzo ocorrem na escória de alto forno após sua hidratação, a presença das fases mineralógicas Akermanita e ou Gehlenita [ $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ ]. Estes silicatos de cálcio (e ou magnésio), apresentam uma estrutura tetragonal e isomórfica, podendo ser observados cristais prismáticos tendendo para cristais tabulares finos. Foram descritos pela primeira vez pelo mineralogista sueco Richard Akerman a partir de amostra de escória da produção de ferro em forno na Suécia (Ferreira, 1980; Branco, 1982).

Os difratogramas da fração escória de alto forno, ilustrados nas Figuras 4.6 e 4.7, confirmam o estado amorfo das amostras utilizadas, caracterizando ter sido originada no processo de resfriamento rápido. A escória no estado amorfo, isto é, com estrutura vítrea, apresenta propriedades cimentícias quando finamente moída.

Conforme foi exposto no Capítulo 2, a escória de alto forno possui uma relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  variando de 0,9 a 1,2. A possível presença de  $\text{CaO}$  poderia diminuir a

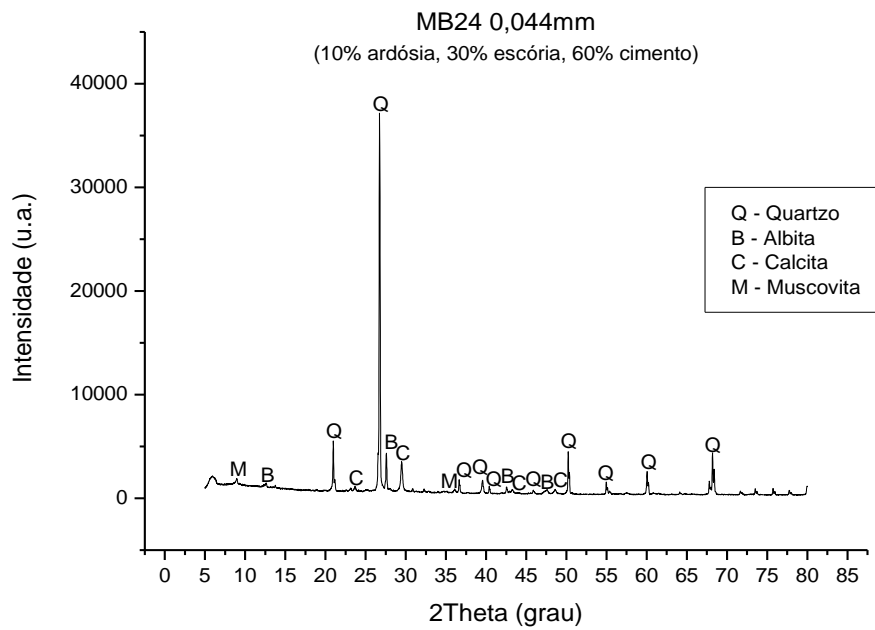
vitrificação (fase amorfa) da escória, que é obtida através do resfriamento brusco em água. Já com o resfriamento lento (resfriada ao ar) da escória de alto-forno obtém-se uma escória expandida. Esta escória é cristalina, não tendo propriedades cimentícias, porém pode ser usada apenas como agregado para concretos, asfaltos e lastros.

Quando o processo de resfriamento da escória é rápido, obtém-se a escória granulada ou peletizada, que é um material predominantemente amorfo e potencialmente reativo. A granulação altera completamente as propriedades da escória, apresentando-se no estado amorfo. A escória granulada apresenta estrutura vítrea, podendo apresentar propriedades cimentícias quando finamente moída (Dal Molin, 2005 apud Fonseca, 2010).

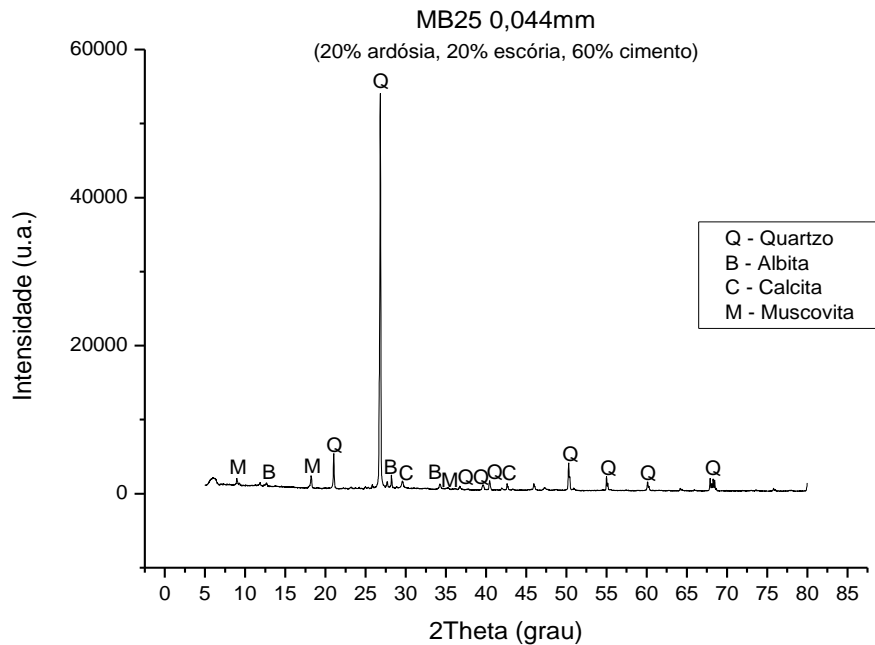
Segundo Moreira (2006), as escórias vítreas mantêm as propriedades hidráulicas desejadas para a indústria cimenteira, pois se comportam termodinamicamente instáveis e hidraulicamente latentes podendo ser ativadas, em função de sua granulometria em meio aquoso. Já, as escórias cristalinas não apresentam propriedades hidráulicas e são em sua maioria, termodinamicamente estáveis. Assim, a composição mineralógica da escória de alto forno, quando submetida a esfriamento rápido, constitui-se majoritariamente vítrea, amorfa, e apta para ser utilizada como aditivos ou ligantes hidráulicos. Quando se esfria lentamente, constituem-se majoritariamente cristalinas, aptas para serem utilizadas como agregados. (Moreira, 2006).

Assim, a escória de alto forno finamente moída utilizada na pesquisa, de acordo com os difratogramas das Figuras 4.6 e 4.7, é amorfa, potencialmente reativa, portanto apta para ser utilizada como aditivos ou ligantes hidráulicos, podendo apresentar propriedades cimentícias.

As Figuras 4.8 apresenta o Difratograma de Raio-X da fração da amostra da argamassa MB 24, constituída de 62,4g de ardósia (10% da massa de cimento preconizada na norma), 187,2g de escória (30%), 374,4g de cimento (60%), 1872g de areia normatizada do IPT e 300 ml de água. A Figura 4.9 mostra o DRX da amostra da argamassa MB 25 constituída de 124,8g de ardósia (20%), 124,8g de escória (20%), 374,4g de cimento (60%), 1872g de areia normatizada do IPT e 300 ml de água.. A Figura 4.10 mostra o Difratograma de Raio-X da fração da amostra da argamassa padrão definida pela norma técnica NBR 7215/1996, composta de areia normatizada do IPT (1872g), cimento (624 g) e água (300ml).

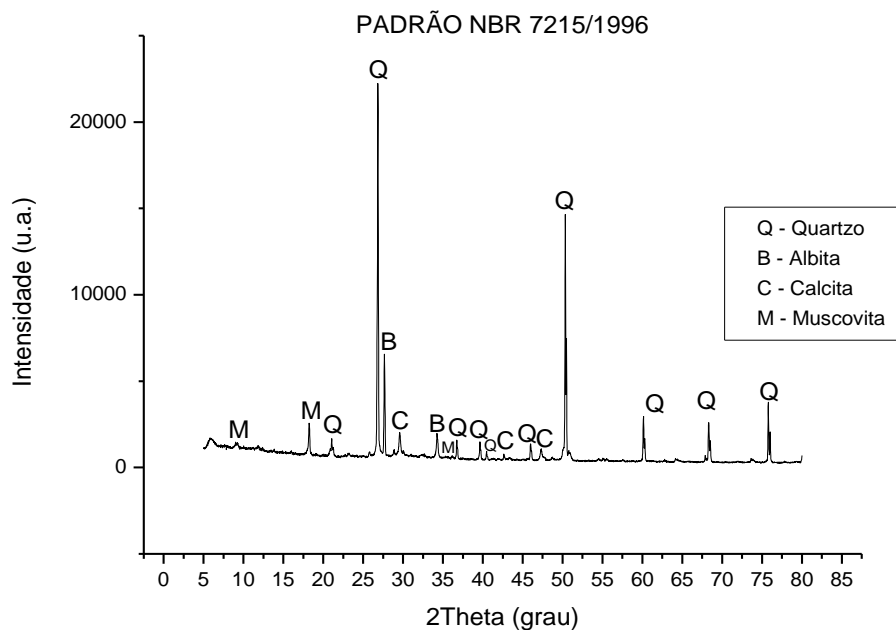


**Figura 4.8** - Difratoograma da fração da amostra da argamassa MB 24  
Fonte: dados do autor, 2016



**Figura 4.9** - Difratoograma da fração da amostra da argamassa MB 25  
Fonte: dados do autor, 2016

A análise dos difratogramas das amostras de argamassa MB 24 e MB 25 ilustrados nas Figuras 4.8 e 4.9 demonstra semelhança entre ambos, tanto na intensidade dos picos de ocorrência, como nos elementos mais significativos, representados pelo quartzo, albita, calcita e muscovita. Ambas apresentam um pico de alta intensidade de quartzo, seguidos dos outros com baixa intensidade. Parte destes picos elevados de quartzo tem origem nas 1872g de areia normatizada, integrante da norma.



**Figura 4.10** - Difratograma da fração da amostra da argamassa padrão  
 Fonte: dados do autor, 2016

Os DRXs das amostras de argamassas com resíduos de ardósia e da escória, comparadas com a argamassa padrão, apresentam composição mineralógica bastante semelhante. Observa-se como fase majoritária nas três amostras o quartzo, e como fases minoritárias a albita, a calcita e a muscovita.

Mas, observou-se que a amostra MB 24 apresenta maior semelhança com a amostra padrão, ou seja, existência de picos de alta intensidade de quartzo, um pico mediano de albita e vários de quartzo com intensidade intermediária, seguidos dos demais com intensidades menores.

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DE ÁREA SUPERFICIAL POR MÉTODO BET

A determinação das áreas superficiais pelo método de adsorção de N<sub>2</sub> (método BET de adsorção física ou fissiosorção) foi realizada nas amostras da argamassa padrão (segundo a norma NBR 7215/1996), com idade de 14 dias e 28 dias, e nas amostras das argamassas com adição da ardósia e da escória de alto forno MB 20 e MB 21 com idade de 14 dias, MB 24 e MB 25 com idade de 28 dias.

A área superficial de cada amostra analisada pelo processo BET, permite estabelecer indiretamente os níveis de porosidade (distribuição de tamanho e ou volume de poros) das amostras, considerado um fator muito importante na definição de algumas características microestruturais ou propriedades mecânicas das argamassas, entre elas a resistência à ruptura e o aumento da performance das argamassas (efeito filler).

A Tabela 4.7 a seguir apresenta o registro dos valores das áreas superficiais obtidas neste ensaio pelo método BET.

**Tabela 4.7** - Resultado das áreas superficiais

<b>Amostra</b>	<b>Área Superficial Específica (SBET)</b>
Padrão (idade 14 dias)	4,796 m <sup>2</sup> /g
Padrão (idade 28 dias)	4,320 m <sup>2</sup> /g
MB 20 (idade 14 dias)	9,815 m <sup>2</sup> /g
MB 21 (idade 14 dias)	6,973 m <sup>2</sup> /g
MB 24 (idade 28 dias)	7,057 m <sup>2</sup> /g
MB 25 (idade 28 dias)	7,597 m <sup>2</sup> /g

Fonte: dados do autor, 2016

Comparando os valores das áreas superficiais das duas amostras de argamassa padrão, observou-se que a argamassa padrão com idade de 14 dias registrou maior área superficial do que a argamassa padrão com idade de 28 dias. Com o aumento da idade, possivelmente houve o fechamento de poros abertos ou redução da porosidade total das amostras, acarretando uma menor área superfície em virtude de uma provável reação química dos microconstituintes da pasta cimento com as adições minerais. Com relação



às amostras das argamassas constituídas com a adição de ardósia e escória, suas áreas superficiais apresentaram-se com valores superiores aos valores das áreas superficiais obtidos com as argamassas padrão (com 14 ou 28 dias), com destaque para a amostra MB 20, que registrou o maior valor, da ordem de 10 m<sup>2</sup>/g.

A literatura reporta que área superficial pode ser afetada pela distribuição de tamanho das partículas, pela distribuição de tamanhos de poros (tipo de isotermas), pelo volume e forma dos poros e ainda pela rugosidade superficial. Por exemplo, a rugosidade intrínseca da superfície pode alterar a área superficial, registrando-se valores ligeiramente maiores do que os valores normalmente obtidos quando as superfícies são lisas.

A porosidade da fração com ardósia e escória é possivelmente afetada pela cinética das reações na cura da argamassa, sendo muito importante para entendimento dos fenômenos físico-químicos que relacionam a área superficial específica das fases sólidas formada pela reação de hidratação do cimento (c/a) com os distintos tipos de resíduos da mistura. Por meio de isotermas de adsorção e dessorção com N<sub>2</sub> (BET), foram avaliadas as áreas superficiais específicas (SBET) e intuído indiretamente a porosidade das frações com resíduos e o Padrão. As amostras Padrão apresentaram as menores SBET em relação as demais amostras. Resultados referentes à SBET e à porosidade das partículas foram relacionados à adsorção máxima (ou P<sub>máx</sub>) determinada pela isoterma de Langmuir (Anexo III).

A classe de poros predominante nas frações com ardósia e escória foi de mesoporos e macroporos, de acordo com a IUPAC<sup>14</sup> para avaliação de área específica e distribuição de tamanho de poros através de técnicas de adsorção de gases, onde o tipo IV de isotermas foram observados. A IUPAC recomenda uma classificação para as faixas de tamanho, considerando as propriedades de adsorção. Assim, têm-se: microporos (< 2 nm); mesoporos (2 nm – 50 nm) e macroporos (> 50 nm).

---

<sup>14</sup> IUPAC é a sigla de "International Union of Pure and Applied Chemistry", que em português é "União Internacional da Química Pura e Aplicada". É uma organização criada com o objetivo de elaborar as regras da nomenclatura oficial de todos os compostos químicos (Disponível em <https://www.significados.com.br/iupac/>)

A aglomeração de partículas também afeta, diminuindo a área superficial, ao contrário da rugosidade. Ela interfere na medição do tamanho da partícula, não permitindo que toda a superfície fique exposta.

Dos três parâmetros relacionados, tamanho das partículas, porosidade e rugosidade, acredita-se que foi medido mais a porosidade e a rugosidade das partículas. Isto porque não foi observado na análise de microscopia eletrônica de varredura – MEV uma grande intensidade de material granulado, mas sim a presença de material pulverulento, pó e coloides. Então, indiretamente, o ensaio de BET registrou mais a porosidade das amostras. Portanto, em relação ao padrão, a porosidade pode ter tido maior efeito, tornando a argamassa com as adições de ardósia e escória mais porosas que a argamassa padrão.

É importante salientar que esta porosidade se refere a espaços muito inferiores ao que se observou na microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrado a seguir, pois são porosidades constituídas de macro e mesoporos, da ordem de algumas centenas de Angstroms (Å) ou de alguns nanômetros. No MEV, é possível se observar uma porosidade da ordem de micrometros, motivo pelo qual tem-se a impressão de que os resíduos de ardósia e a escória demonstraram ter maior efetividade no fechamento desses tipos de poros, e não de macro ou mesoporos identificados por BET.

Este método desenvolvido por Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller (BET ou Teoria de Adsorção Multimolecular) é baseado num modelo matemático que descreve a adsorção física de moléculas de gás (em geral o  $N_2$  e He) sobre uma superfície sólida, servindo para medição de área superficial específica e porosidade de um material. Dado que se utiliza da adsorção do gás formando uma monocamada do gás, que permeia todos os poros abertos de dimensões moleculares.

Uma importante repercussão destes parâmetros topográficos, SBET e porosidade, está relacionada com o fato de que o material mais fino ou poroso absorve mais água, alterando a disponibilidade da água de hidratação do cimento (c/a), formando como consequência possivelmente mais ligações de van der Waals, que são mais fracas que as ligações de primeira ordem (iônicas, covalentes). As ligações primárias têm energia da

ordem 100 kcal/mol, enquanto que as ligações secundárias de van der Waals, por exemplo do tipo dipolo–dipolo, são inferiores 10 kcal/mol.

Como consequência, é possível esperar uma resistência mecânica relativamente menor com os resíduos de ardósia e escória, embora tenha sido constatado, nas análises da microestrutura no MEV, uma maior reatividade da argamassa com adição da ardósia e escória do que com a argamassa padrão, em locais de possível hidratação completa do cimento.

Nesta pesquisa, não utilizou aditivos ou agentes tensoativos para aumentar a molhabilidade, fazendo com que mais água esteja disponível para reações, o que explica a grande quantidade de cimento não hidratado e ou de agregados de ardósia e escória presentes nas microfotografias do MEV. O uso de aditivos eliminando os aglomerantes não hidratados ou dispersando os agregados de partículas possibilitará que as partículas muito finas, preencham com mais efetividade os espaços vazios, possivelmente aumentando a resistência mecânica destas argamassas em estudo comparadas à argamassa padrão.

Castro e Pandolfelli (2009) descrevem que esses aglomerados formados pelo contato com a água influenciam a reologia das suspensões e podem interferir no empacotamento e, conseqüentemente, na microestrutura do material. Como consequência, os produtos podem apresentar maior quantidade de defeitos e com microestruturas heterogêneas.

*[...] por isto, os aglomerados devem ser eliminados, provocando a dispersão das suspensões usando aditivos e evitando a sedimentação de partículas e conseqüente segregação de fases.*

#### **4.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV**

Através da técnica de análise topográfica e composição realizada por microscopia eletrônica de varredura acoplada com microanalisador de espectrometria por dispersão de energia de raios-X (MEV/EDS) foram obtidas informações químicas da amostra em estudo.

Conforme descrito no Capítulo 3.5, na preparação das amostras para a análise de microscopia eletrônica de varredura, fragmentos dos corpos-de-prova MB 20, MB 21, MB 24, MB 25 e dos padrões P20-21 e P24-25 foram seccionados, lixados e polidos, sendo em seguida metalizados com carbono (UFMG) ou platina (Phosther). Este recobrimento tem por objetivo tornar condutora a superfície da amostra para evitar a fusão da mesma devido à alta energia que é submetida, melhorando a qualidade das imagens obtidas. Utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura no Centro de Microscopia Eletrônica de Varredura da UFMG e da empresa Phosther Aglomerações Ltda., onde foram realizadas as análises das amostras citadas acima.

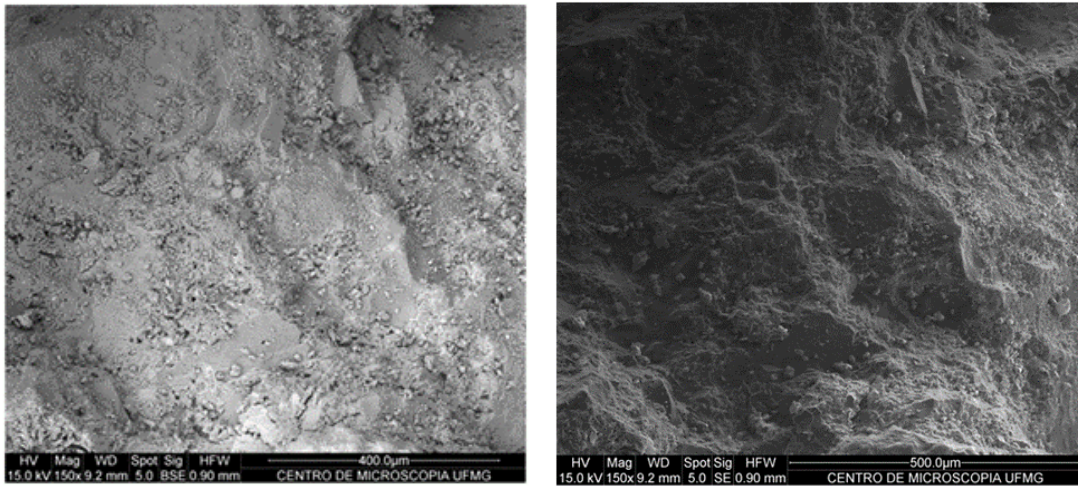
As Figuras 4.11 a 4.52 a seguir apresentam fotomicrografias com os resultados destas análises de MEV e os respectivos registros dos Espectrogramas da Difractometria de Raios X realizados na UFMG, indicando a presença dos elementos e compostos químicos em destaque nas amostras relacionadas. As Figuras 4.53 a 4.59 são fotomicrografias apresentando resultados de MEV realizadas pela Phosther. Todos os registros representados nas Figuras 4.11 a 4.59 são dados do autor levantados nesta pesquisa.

A Figura 4.11, a seguir, mostra uma imagem da superfície da amostra MB 20 após ensaios de ruptura.



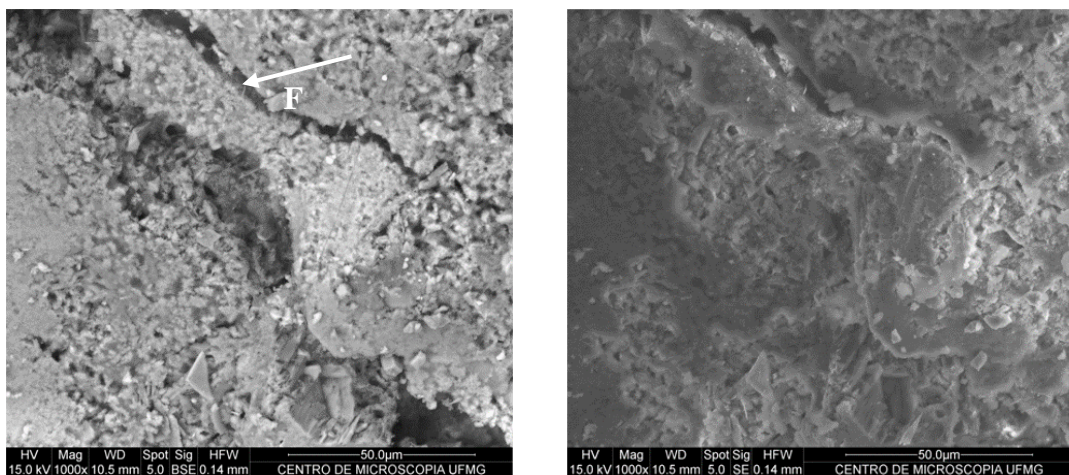
**Figura 4.11** – Superfície de ruptura da amostra MB 20  
Fonte: dados do autor, 2016

A Figura 4.12 apresenta a fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20, obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) – Aumento: 150x, indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente.

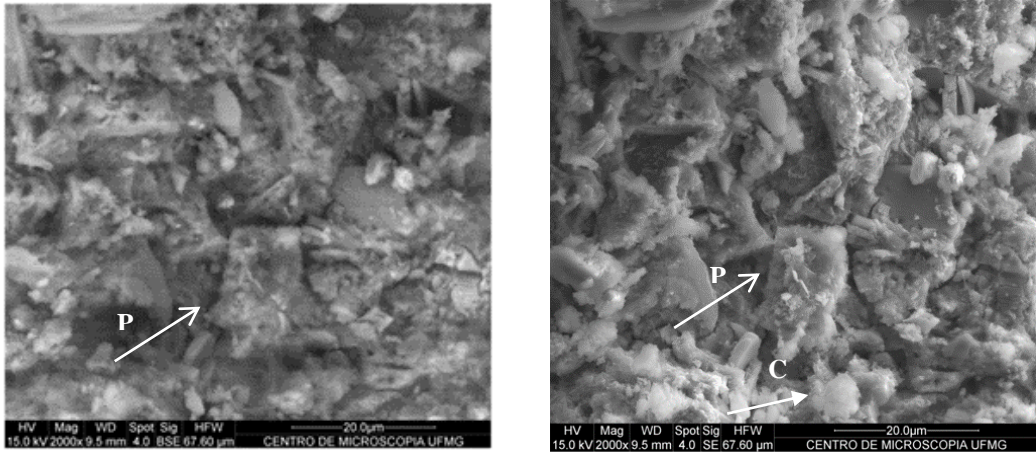


**Figura 4.12** – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20 – Aumento: 150x  
Fonte: dados do autor, 2016

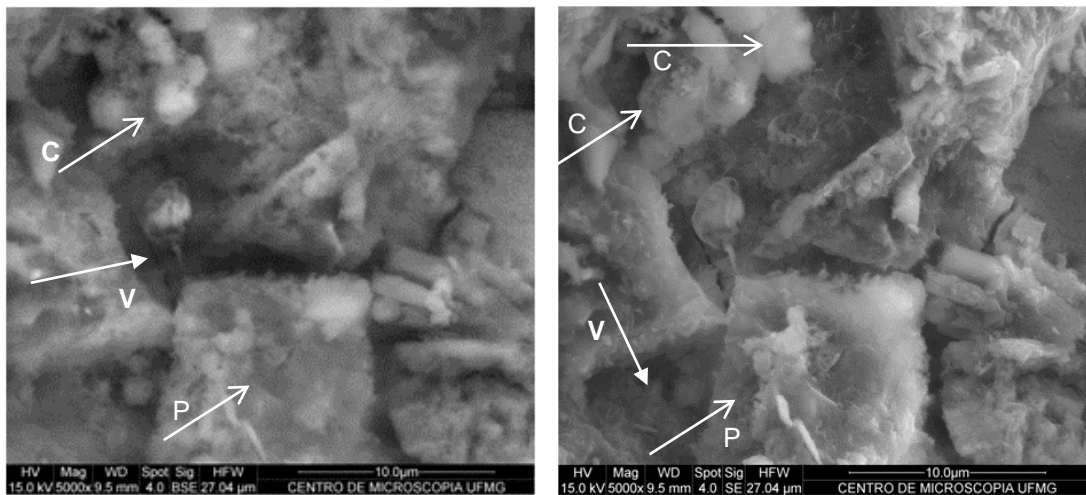
A Figura 4.13 mostra fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20, obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) – Aumento: 1000x, indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente. A seta (F) retrata uma microfissura.



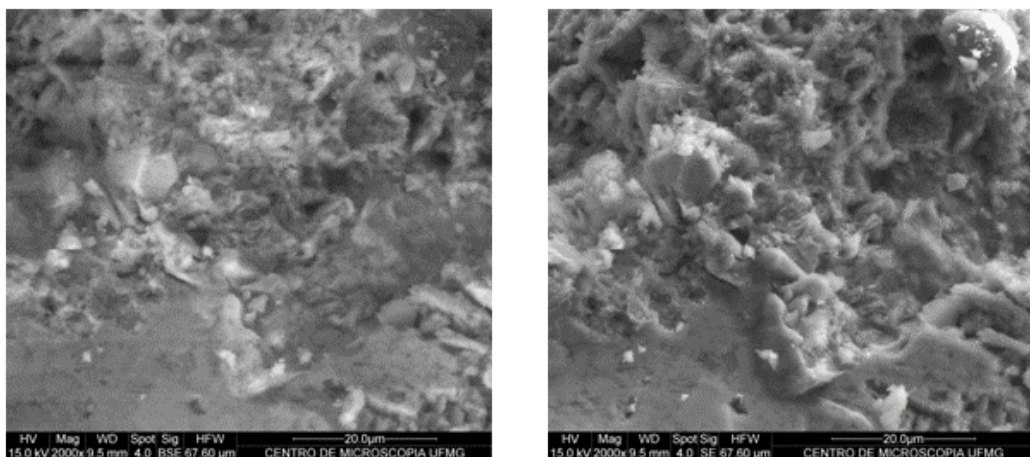
**Figura 4.13** – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20 – Aumento: 1000x.  
Fonte: dados do autor, 2016



**Figura 4.14** – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20 - Aumento: 2000 x  
 Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários). Seta (P) indica a presença de portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e seta (C) carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ). Fonte: dados do autor, 2016



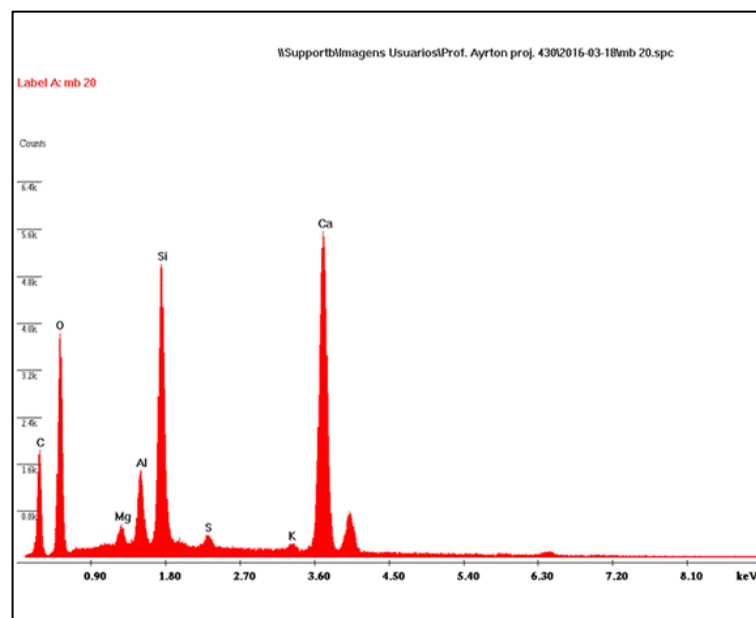
**Figura 4.15** – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20 - Aumento: 5000x  
 Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) — Seta (P) indica a presença de portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e seta (C) carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ). A seta (V) representa vazios capilares. Fonte: dados do autor, 2016



**Figura 4.16** – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20– Aumento: 2000x  
 Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários). Estrutura compacta e rija. Fonte: dados do autor, 2016

Pode-se observar nas imagens de MEV, após confirmação das composições por EDS, que os principais constituintes destas amostras são: a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e o carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ), além da presença de trincas, porosidades e ou poros preenchidos por produtos das reações química da pasta cimento. Não foi feita a observação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) visualizável. Justifica-se pela referência areal pois, considerando por exemplo um aumento de 500x, a área padrão de análise é representada por aproximadamente 1mm x 1mm.

A Figura 4.17 mostra um dos espectrogramas de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 20 indicando a presença mais marcante dos elementos químicos: cálcio, silício, alumínio, magnésio, oxigênio, carbono e, em menor intensidade, enxofre e potássio. Nos demais EDS das amostras observou-se a presença predominante destes elementos químicos, mas com picos de intensidade variando entre as misturas e, também, entre as diferentes granulometrias das amostras.



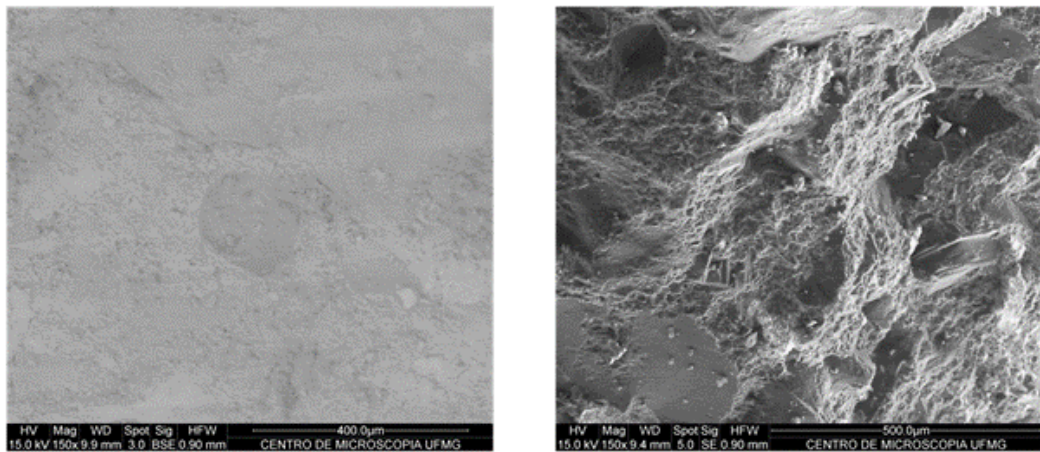
**Figura 4.17** – Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 20.

Fonte: dados do autor, 2016

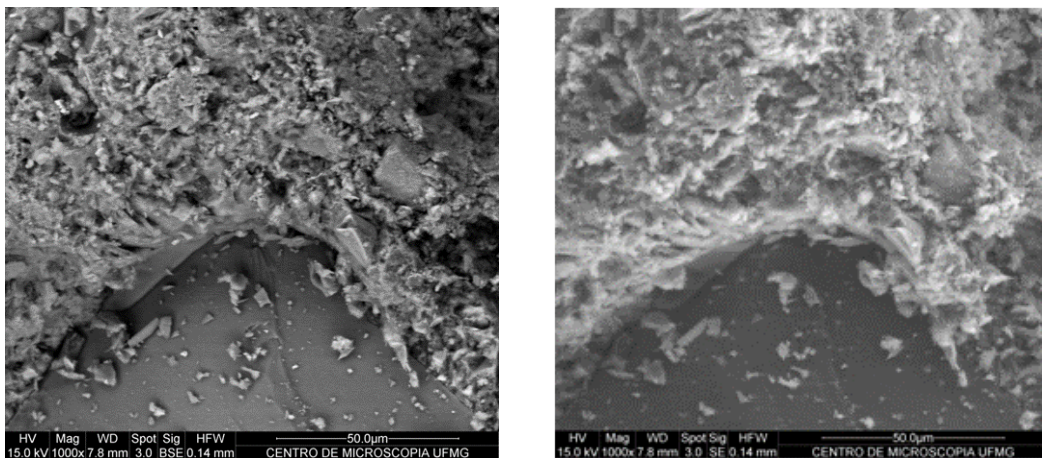
A Figura 4.18 mostra uma imagem da superfície da amostra MB 21 após ensaio de ruptura. As Figuras 4.19 a 4.23 a seguir apresentam os resultados destas análises de MEV e os respectivos registros dos Espectrogramas da Difratomia de Raios X.



**Figura 4.18** - Superfície de ruptura da amostra MB 21  
Fonte: dados do autor, 2016

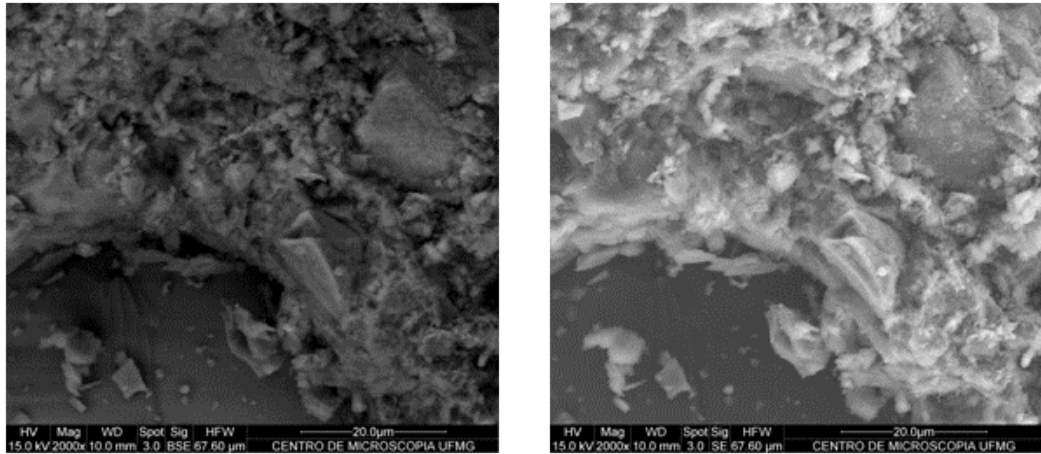


**Figura 4.19** – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 21– Aumento: 150x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente.  
Fonte: dados do autor, 2016

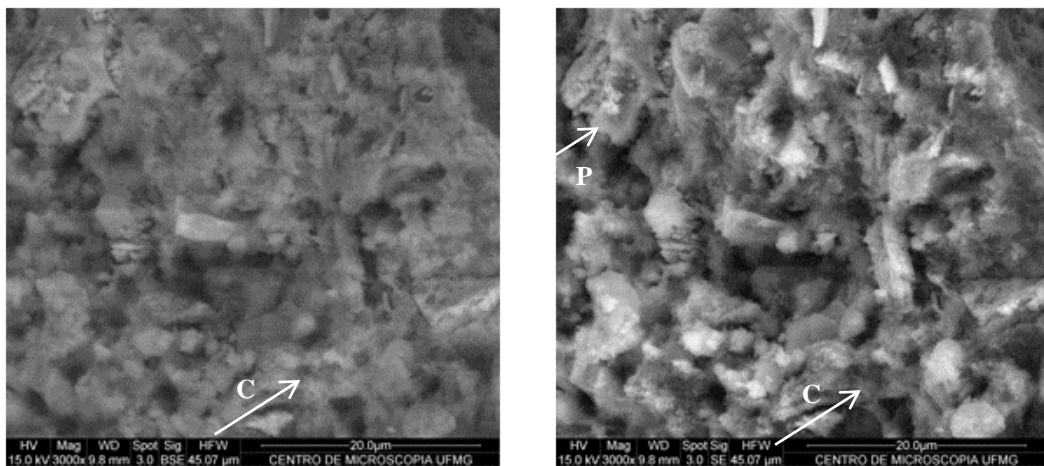


**Figura 4.20** – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 21 – Aumento: 1000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente.  
Fonte: dados do autor, 2016



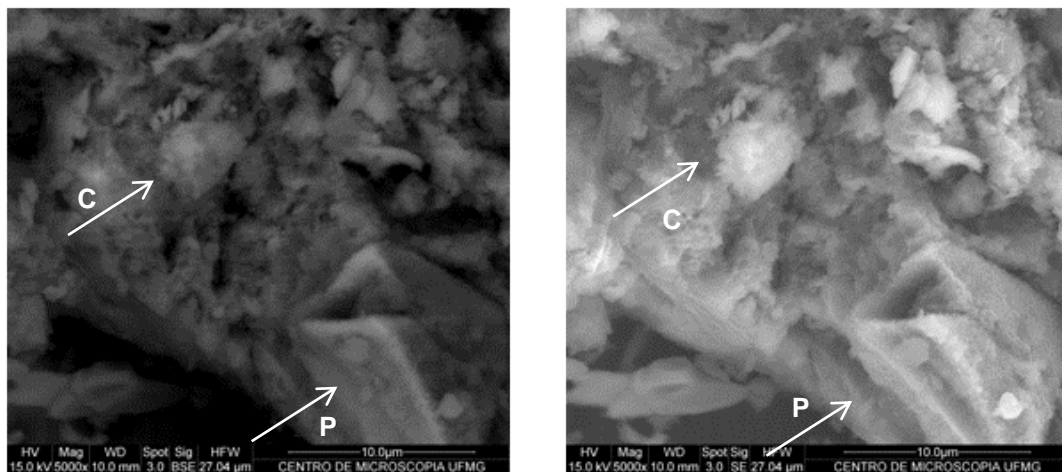


**Figura 4.21** – Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 21– Aumento: 2000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente.



**Figura 4.22** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 21– Aumento: 3000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) – A seta (P) indica a presença de portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e seta (C) carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ).

Fonte: dados do autor, 2016



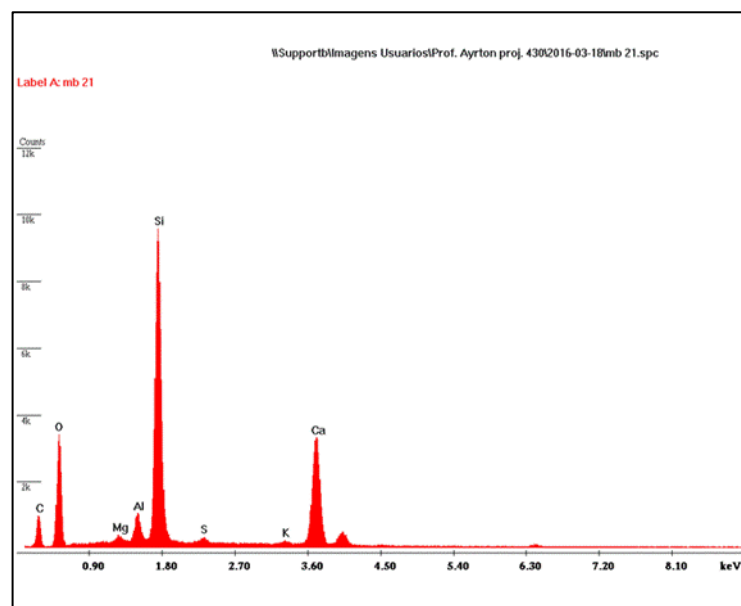
**Figura 4.23** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 21– Aumento: 5000x e 3000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) – Seta (P) indica a presença de portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), seta (C) carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ).

Fonte: dados do autor, 2016

Nestas imagens de MEV, após confirmação das composições por EDS, observa-se que os principais constituintes destas amostras também são: a portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e o carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ), além da presença de trincas, porosidades e ou poros preenchidos por produtos das reações química da pasta cimento. Da mesma forma, não foi feita a observação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) visualizável.

Um comparativo entre as microestruturas dos cristais precipitados observadas na amostra MB 20 e MB 21, percebe-se que a substituição de escória moída por ardósia moída propiciou a aparição de uma estrutura mais refinada (cristais de menores tamanhos) mais rica em carbonato de cálcio, fato que pode estar associado ao mecanismo de aceleração na precipitação de mais cristais de carbonatos de cálcio no mecanismo de hidratação, endurecimento e cura das argamassas. É possível que a maior presença do carbonato de cálcio nestas amostras esteja associada com a maior porosidade indicada no capítulo anterior. Esta maior porosidade pode significar uma facilidade de entrada de  $\text{CO}_2$  para promover a carbonatação, isto é, para transformar o hidróxido no carbonato através da entrada do  $\text{CO}_2$ .

A Figura 4.24 mostra um dos espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 21 indicando a presença predominante dos elementos químicos: cálcio, silício, alumínio, magnésio, enxofre e potássio, com picos de intensidade variando entre as misturas e entre as diferentes granulometrias das amostras.

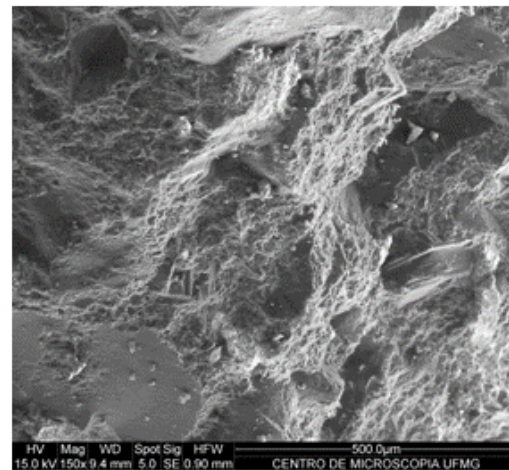
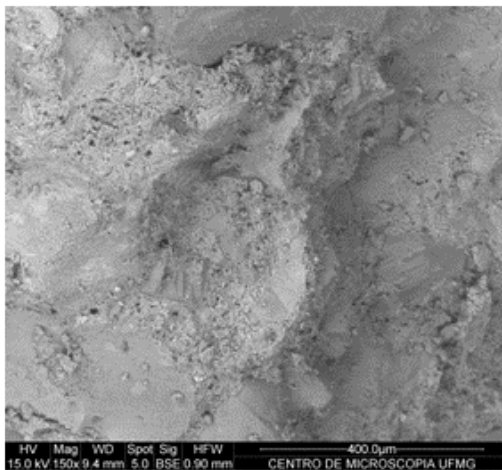


**Figura 4.24** – Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 21

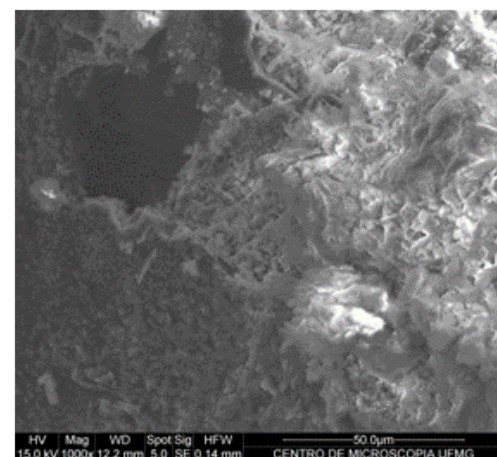
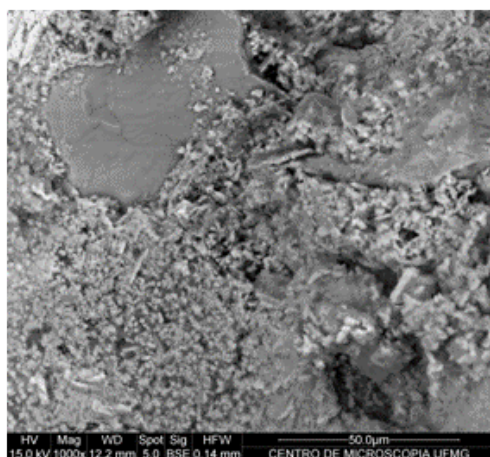
As Figuras 4.26 a 4.30 a seguir apresentam os resultados destas análises de MEV e os respectivos registros dos Espectrogramas da Difratometria de Raios X na amostra MB 24, indicando a presença dos elementos e compostos químicos em destaque nas amostras relacionadas. A Figura 4.25 mostra uma imagem da superfície da amostra MB 24 após ensaio de ruptura.



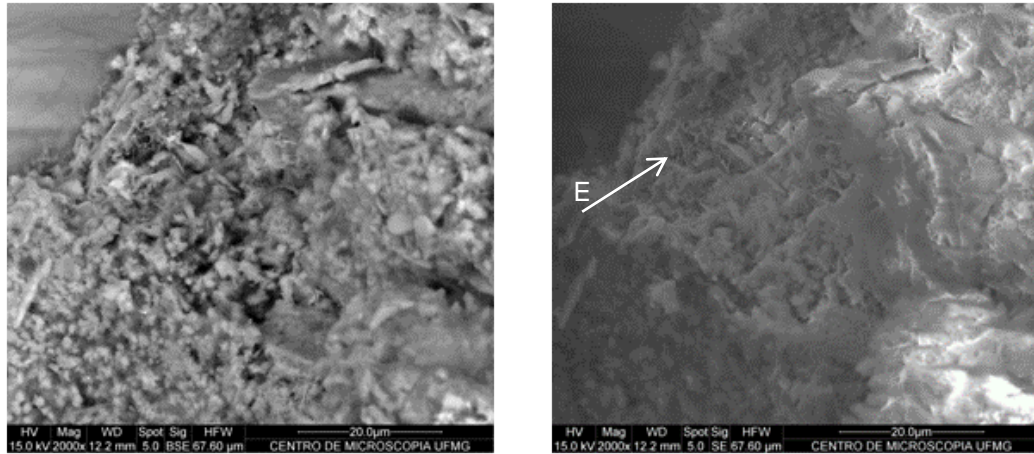
**Figura 4.25** – Superfície de ruptura da amostra MB 24  
Fonte: dados do autor, 2016



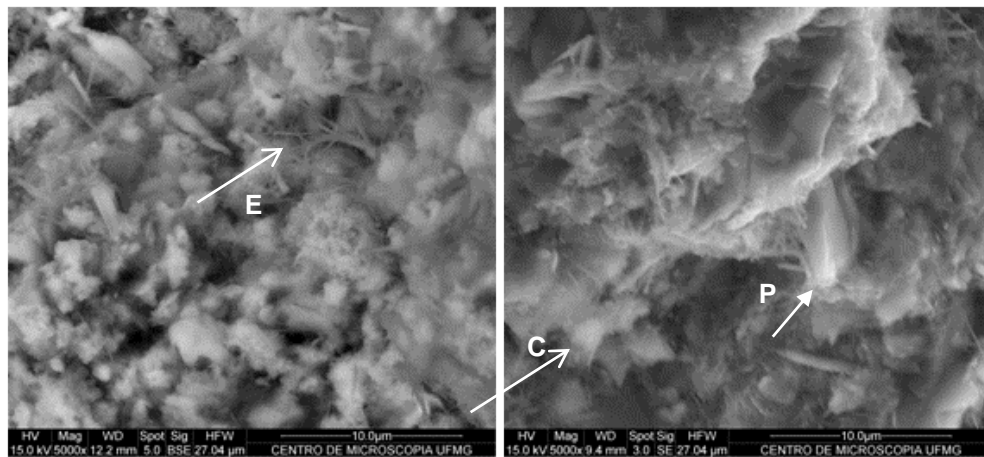
**Figura 4.26** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24– Aumento: 150x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente.



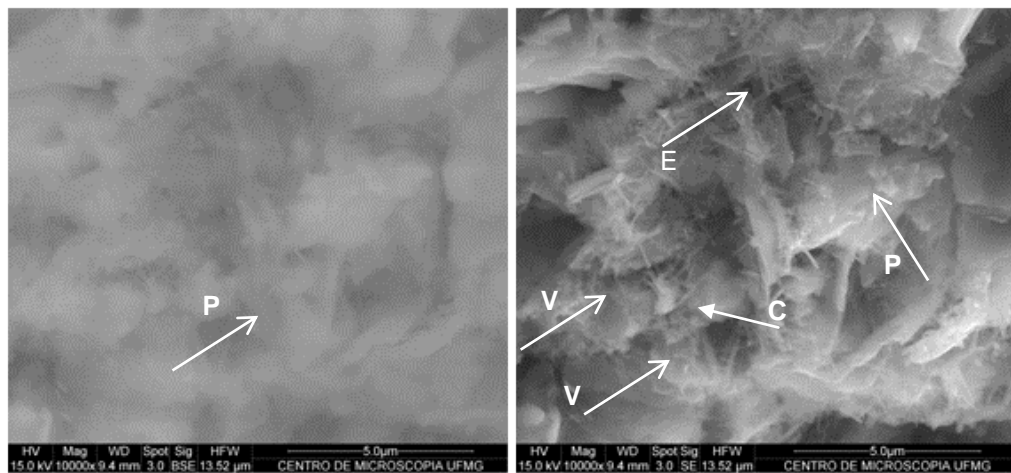
**Figura 4.27** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24– Aumento: 1000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários), indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente. Fonte: dados do autor.



**Figura 4.28** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24– Aumento: 2000x  
 Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente. A seta (E) indica a presença de agulhas de etringita (finas e aciculares ) e pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado.  
 Fonte: dados do autor, 2016



**Figura 4.29** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24 – Aumento: 5000x  
 Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários)– Seta (P) indica a presença de portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), seta (C) carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ) e seta (E) a aparição de agulhas de etringita (finas e aciculares ). Fonte: dados do autor, 2016

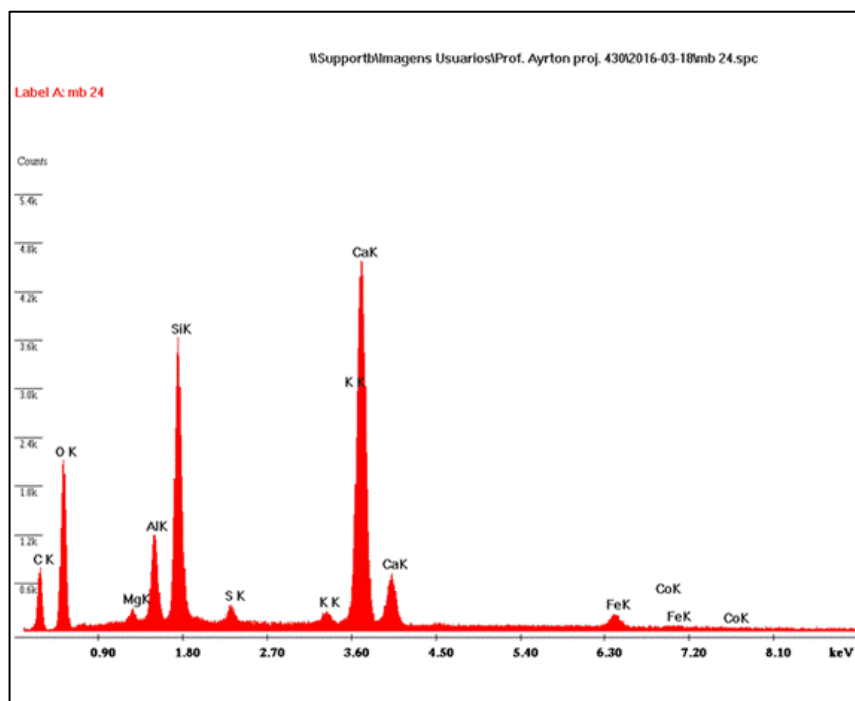


**Figura 4.30** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24 – Aumento: 10000x  
 Obtida por MEV modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários). Seta (P)- presença de portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), seta (C) carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ) e seta (E) - agulhas de etringita (finas e aciculares). A seta (V) indica vazios sendo preenchidos.

Pode-se observa nas imagens de MEV, após confirmação das composições por EDS, que os principais constituintes destas amostras também são: a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), o carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ) e a etringita ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), além da presença de trincas, porosidades e ou poros preenchidos por produtos das reações química da pasta cimento.

Apresenta maior quantidade de carbonato de cálcio, fato que pode estar associado ao mecanismo de aceleração na precipitação de mais cristais de carbonatos de cálcio (carbonatação) por causa dos mecanismos de hidratação, endurecimento e cura das argamassas.

A Figura 4.31 mostra um dos espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 24 indicando a preseça dos elementos químicos: cálcio, silício, alumínio, magnésio, enxofre e potássio, mas com picos de intensidade variando entre as misturas e, também, entre as diferentes granulometrias das amostras.



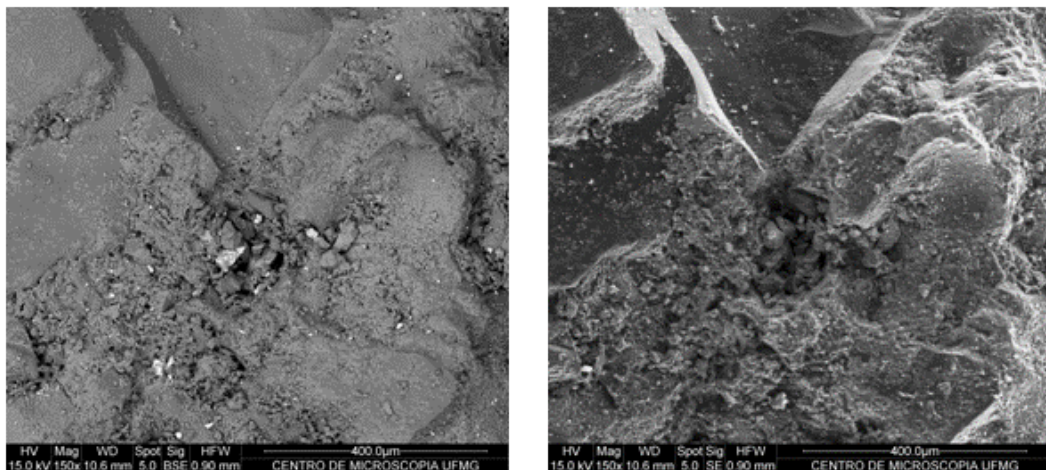
**Figura 4.31** - Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 24

A Figura 4.32 mostra uma imagem da superfície da amostra MB 25 após ensaio de ruptura.



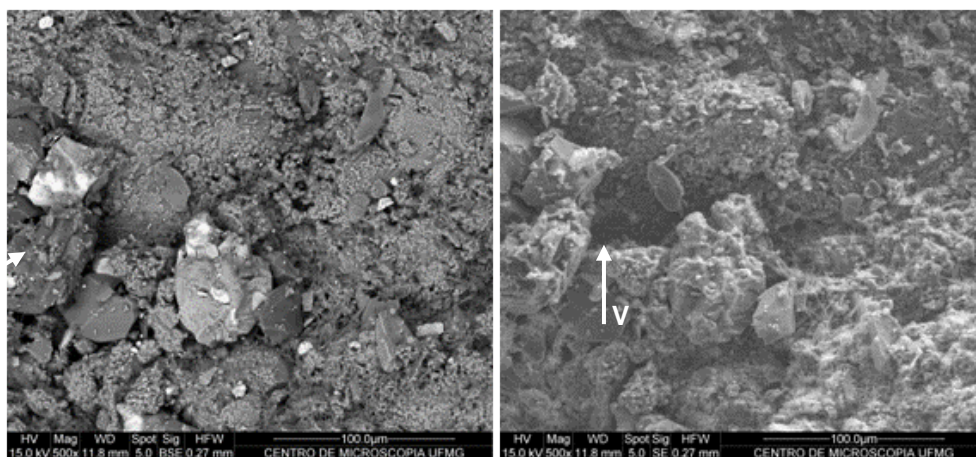
**Figura 4.32** – Superfície de ruptura da amostra MB 25  
 Fonte: dados do autor, 2016

As Figuras 4.33 a 4.37 a seguir apresentam os resultados destas análises de MEV e os respectivos registros dos Espectrogramas da Difratometria de Raios X realizados na UFMG, na amostra MB 25, indicando a presença dos elementos e compostos químicos em destaque nas amostras relacionadas.



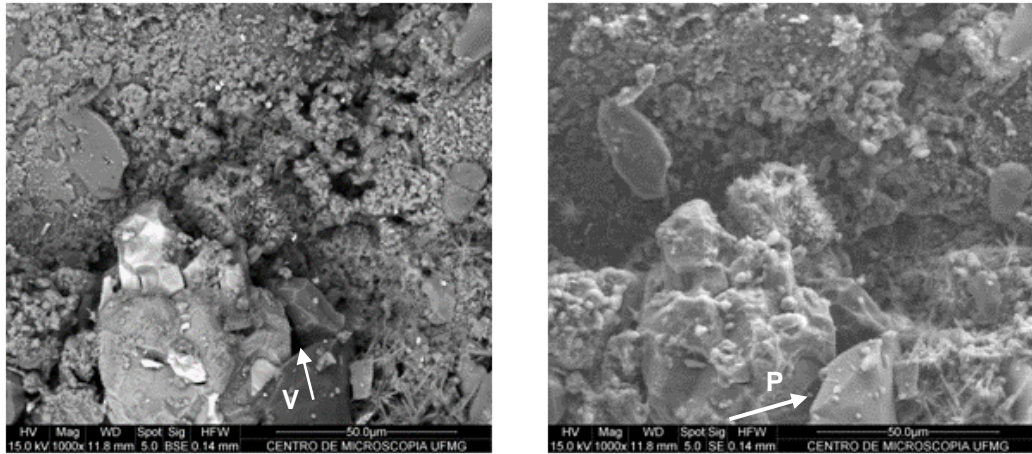
**Figura 4.33** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25 – Aumento: 150 x

Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) – indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente



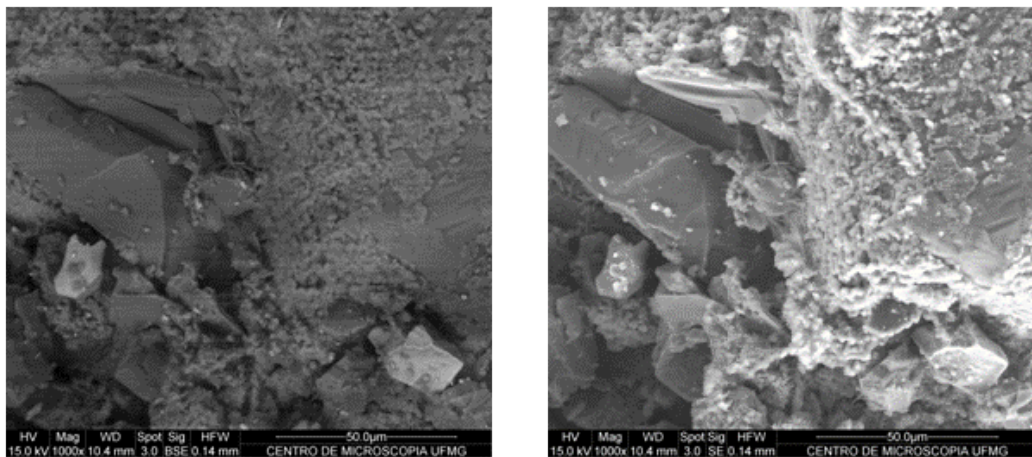
**Figura 4.34** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25 - Aumento: 500x

Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) — indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente. Seta (V) representa vazios capilares. Fonte: dados do autor, 2016



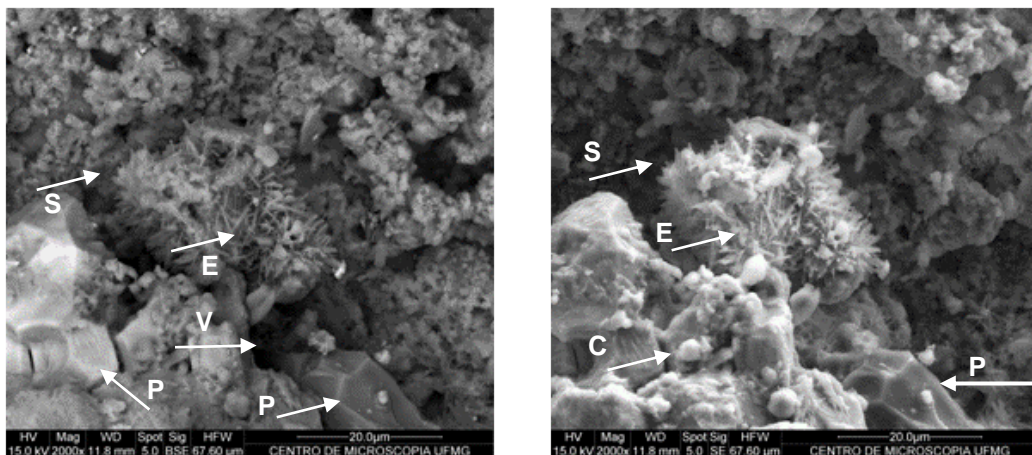
**Figura 4.35** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25– Aumento: 1000x

Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) – indicando a presença de estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente. Seta (P) indica a presença de portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e a seta (V) indica vazios capilares.



**Figura 4.36** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25 – Aumento: 1000x

Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) - indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente. Interfaces entre matriz da pasta de cimento e superfície de material fino adicionado.



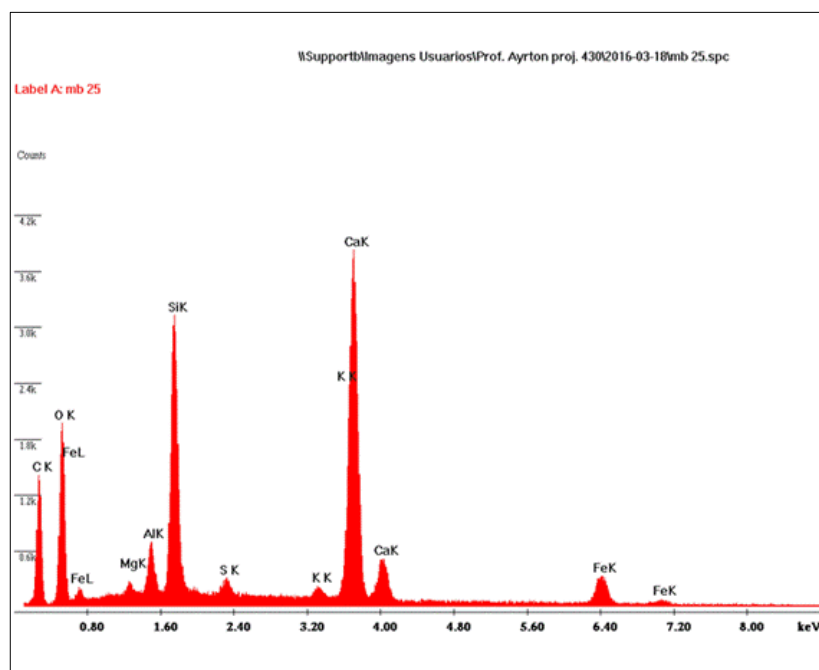
**Figura 4.37** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25) – Aumento: 2000x

Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários - Seta (P) indica a presença de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), seta (C) carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ), seta (E) a aparição de agulhas de etringita (finas e aciculares), seta (S) o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e seta (V) indicando vazios capilares. Fonte: dados do autor, 2016

Pode-se observar nas imagens de MEV, após confirmação das composições por EDS, que os principais constituintes destas amostras também são: a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), o carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ) e a etringita ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), além da presença de trincas, porosidades e ou poros preenchidos por produtos das reações químicas da pasta de cimento.

Comparativo entre as microestruturas dos cristais precipitados observadas das amostras MB 21 e MB 25, percebe-se que a substituição da escória apresenta o mesmo comportamento refinado da microestrutura se comparadas àquelas observadas nas amostras 20 e 24 (menos refinada e não tão rica em cristais de carbonatos de cálcio).

A Figura 4.38 mostra um dos espectrogramas de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 25 indicando a presença predominante dos elementos químicos: cálcio, sílica, alumina, magnésio, enxofre e potássio, mas com picos de intensidade variando entre as misturas e, também, entre as diferentes granulometrias das amostras.



**Figura 4.38** - Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra MB 25

Fonte: dados do autor, 2016

A Figura 4.39 mostra uma imagem da superfície da amostra padrão P20-21 após ensaio de ruptura.

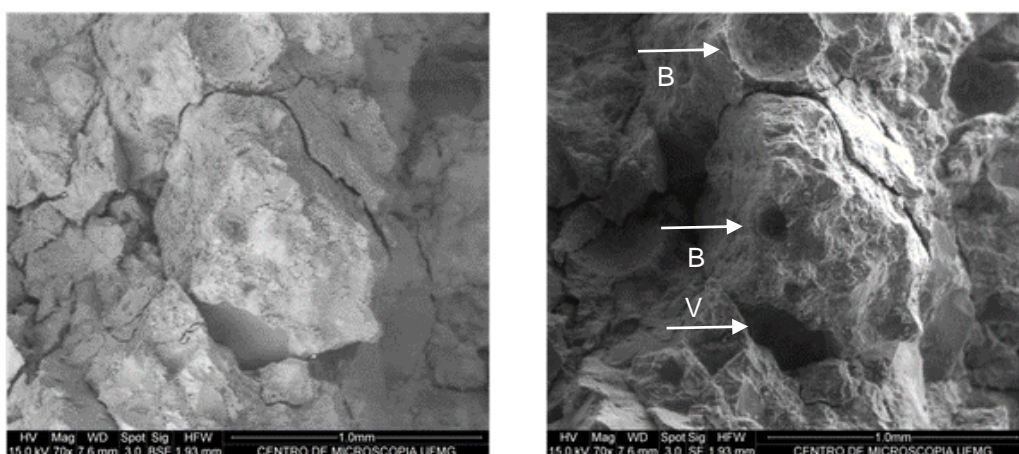




**Figura 4.39** - Superfície de ruptura da amostra padrão P20-21

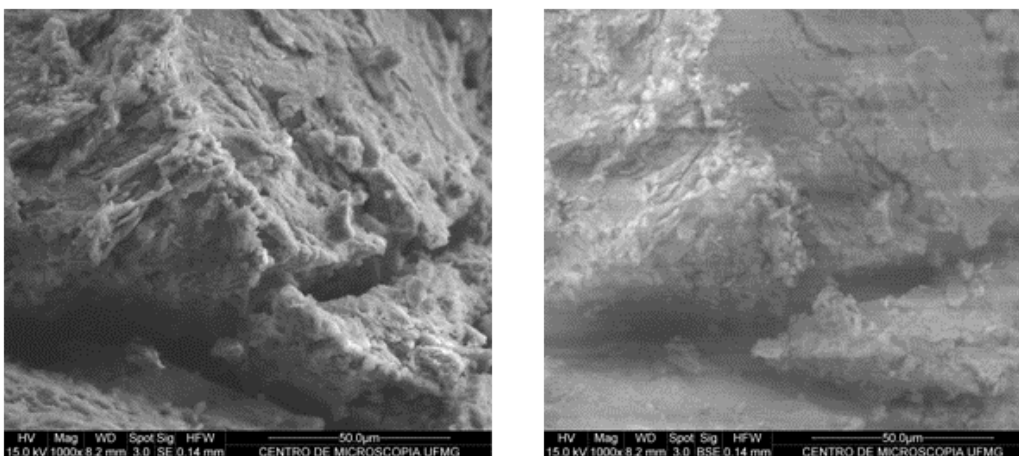
Fonte: dados do autor, 2016

As Figuras 4.40 a 4.44 a seguir apresentam os resultados destas análises de MEV e os respectivos registros dos Espectrogramas da Difractometria de Raios X realizados na UFMG, na amostra P20-21, indicando a presença dos elementos e compostos químicos em destaque nas amostras relacionadas.



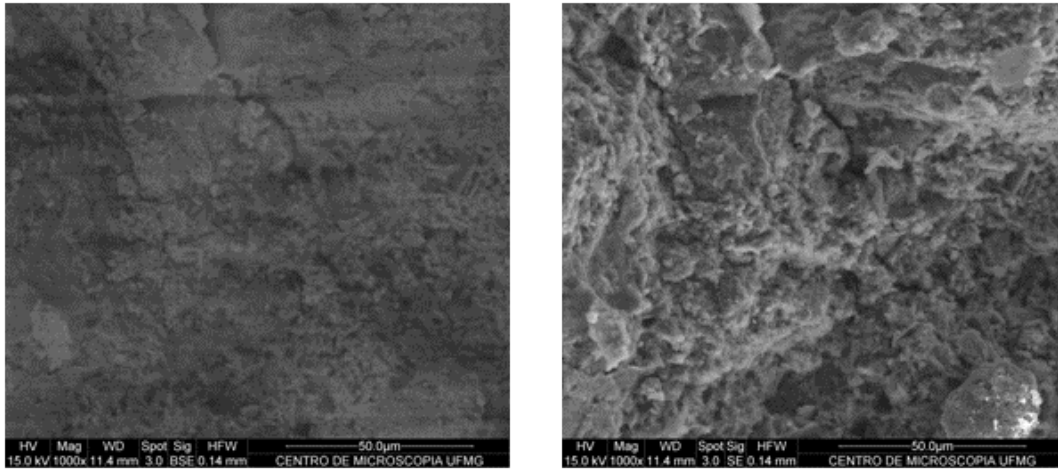
**Figura 4.40** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P20-21 – Aumento: 70 x

Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) - presença de estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente. Seta (B) - espaços vazios (bolhas) gerados por ar ou água. Seta (V) - espaços vazios não preenchidos pelas partículas finas e soluções.

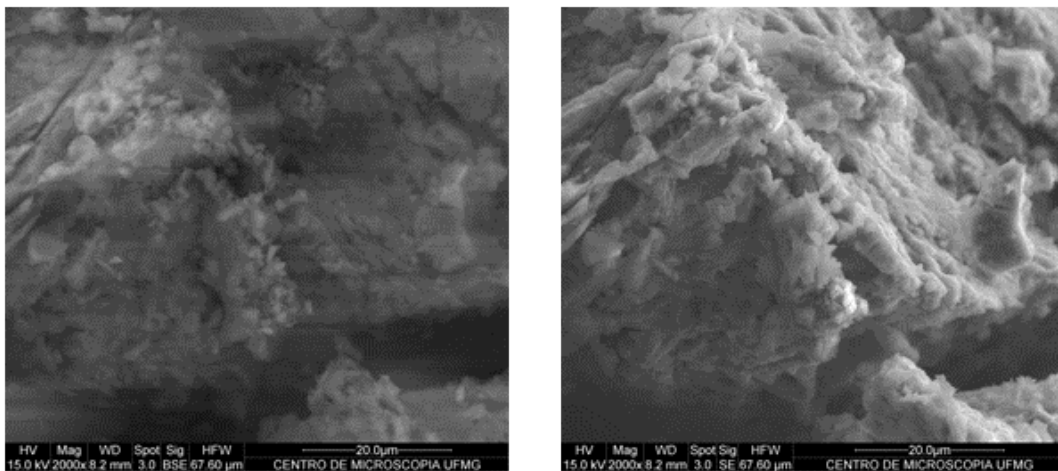


**Figura 4.41** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P20.21 – Aumento: 1000 x

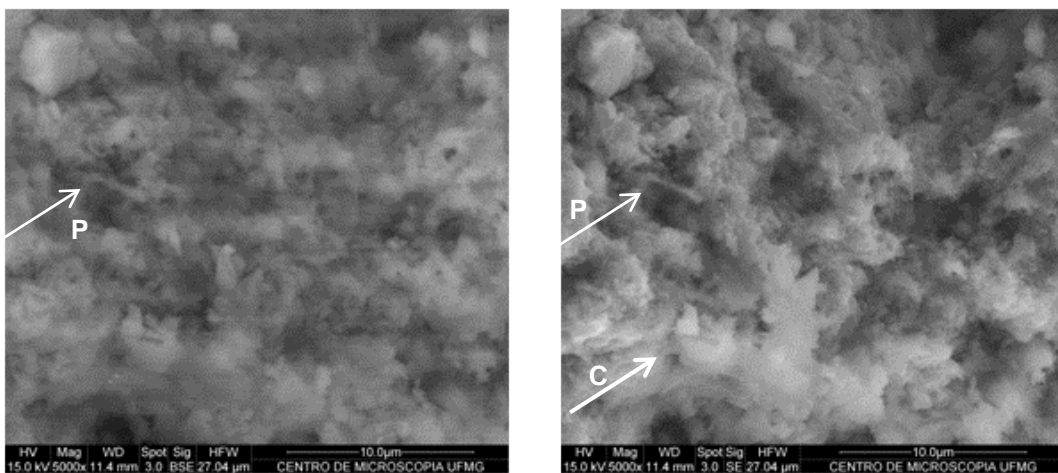
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários)



**Figura 4.42** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P20.21 – Aumento: 1000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) -  
indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente



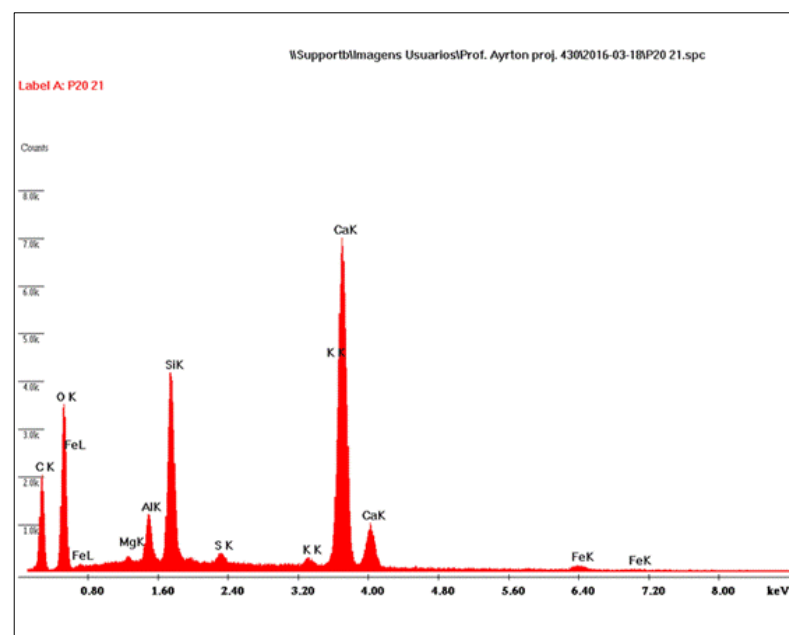
**Figura 4.43** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P.20.21 – Aumento: 2000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundário), indicando  
a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente



**Figura 4.44** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P20.21 – Aumento: 5000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários). Seta (P)  
indica a presença de portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e seta (C) carbonato de cálcio em formação  
( $\text{CaCO}_3$ ).

Pode-se observar nas imagens de MEV, após confirmação das composições por EDS, que os principais constituintes destas amostras também são: a portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), o carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ) e a etringita ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), além da presença de trincas, porosidades e ou poros preenchidos por produtos das reações química da pasta cimento.

A Figura 4.45 mostra um dos espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra padrão P20-21 indicando a presença predominante dos elementos químicos: cálcio, sílica, alumina, magnésio, enxofre e potássio, mas com picos de intensidade variando entre as misturas e, também, entre as diferentes granulometrias das amostras



**Figura 4.45** - Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra P20-21

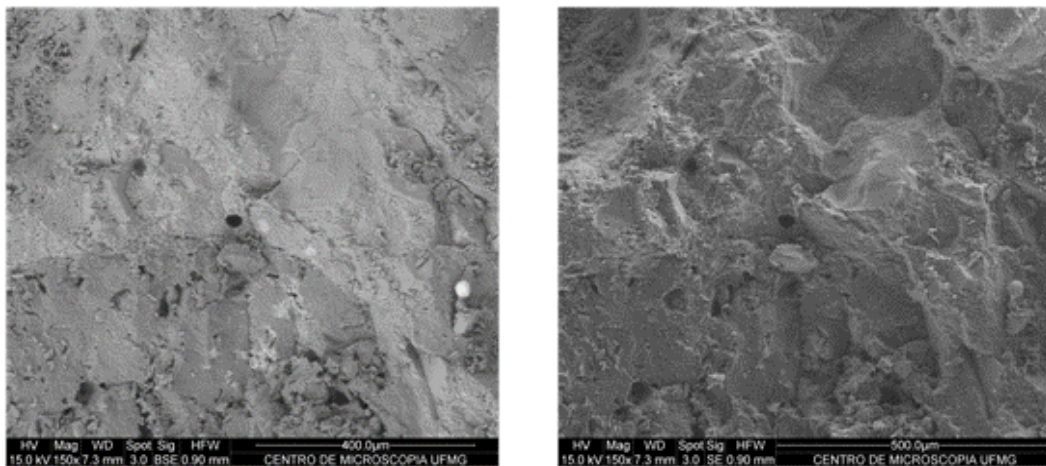
Fonte: dados do autor, 2016

A Figura 4.46 a seguir mostra uma imagem da superfície da amostra padrão P24-25 após ensaio de ruptura.

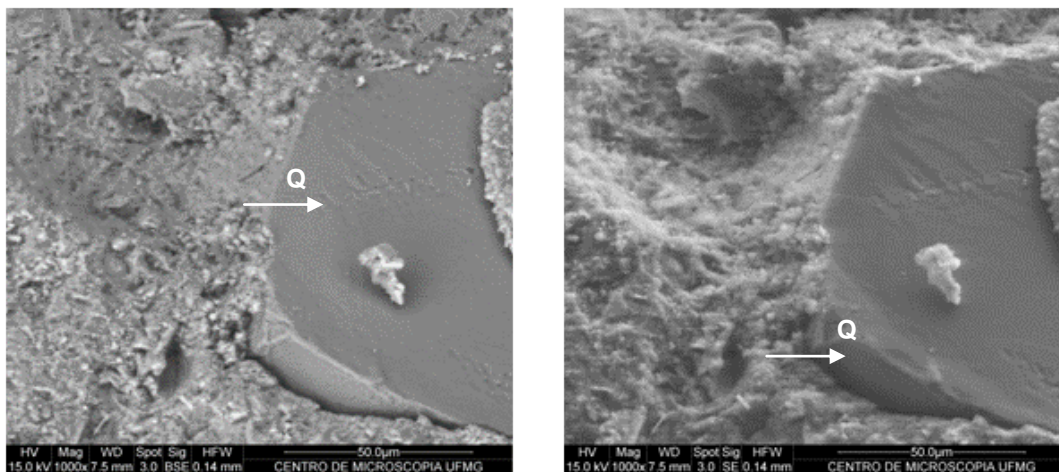


**Figura 4.46** - Superfície de ruptura da amostra padrão P24-25  
Fonte: dados do autor, 2016

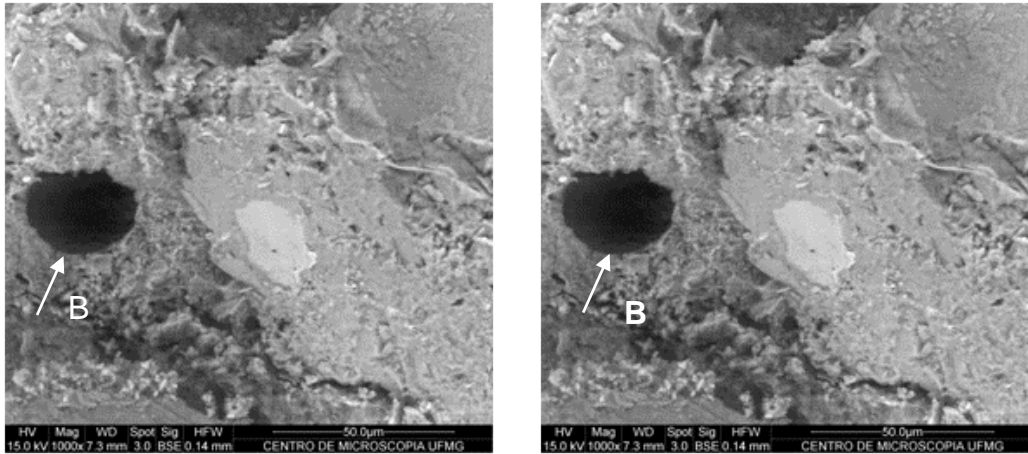
As Figuras 4.47 a 4.51 a seguir apresentam os resultados destas análises de MEV e os respectivos registros dos Espectrogramas da Difratoimetria de Raios X realizados na UFMG, na amostra padrão P24-25, indicando a presença dos elementos e compostos químicos em destaque nas amostras relacionadas.



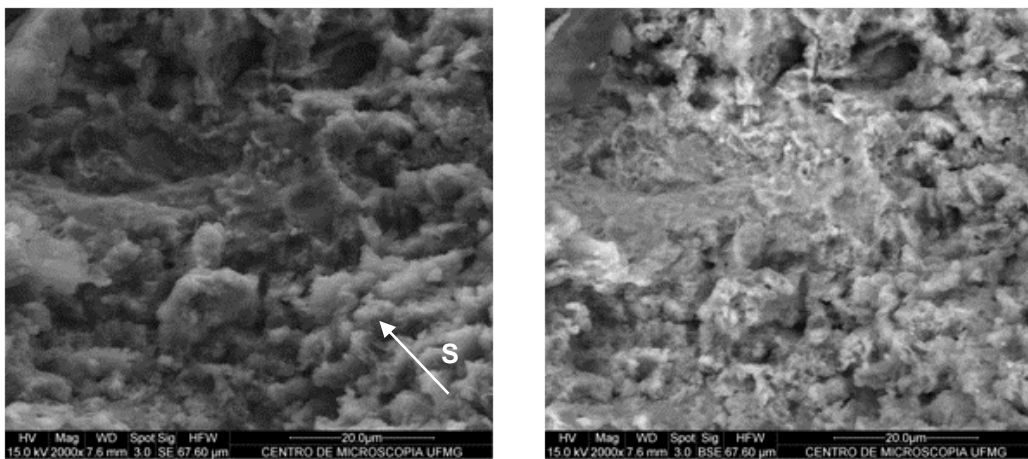
**Figura 4.47** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P24.25 – Aumento: 150x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) -  
indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente



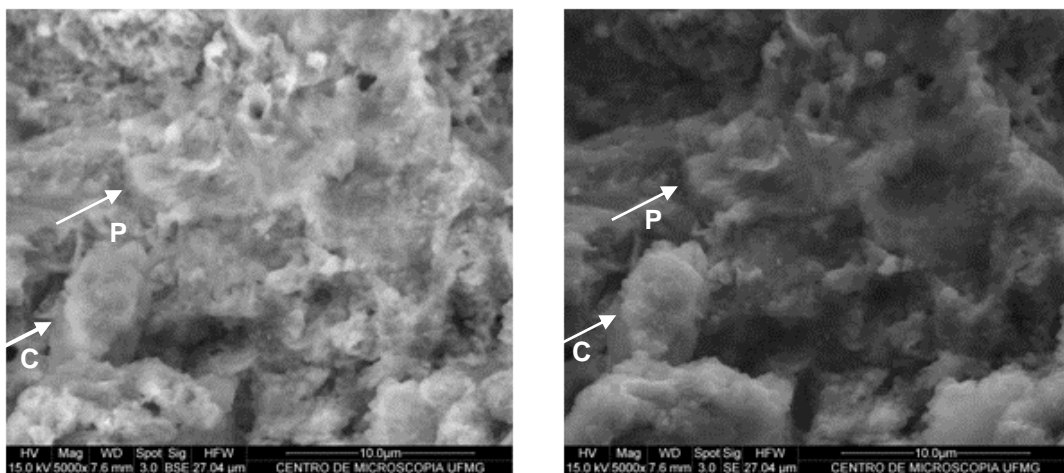
**Figura 4.48** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P24.25 – Aumento: 1000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários),  
indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente.  
Destaque para o grão de quartzo, oriundo da areia (seta Q).



**Figura 4.49** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P24.25 – Aumento: 1000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários), indicando a presença de estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente. A seta (B) representa um espaço vazio na forma de bolha, gerada por ar ou água.



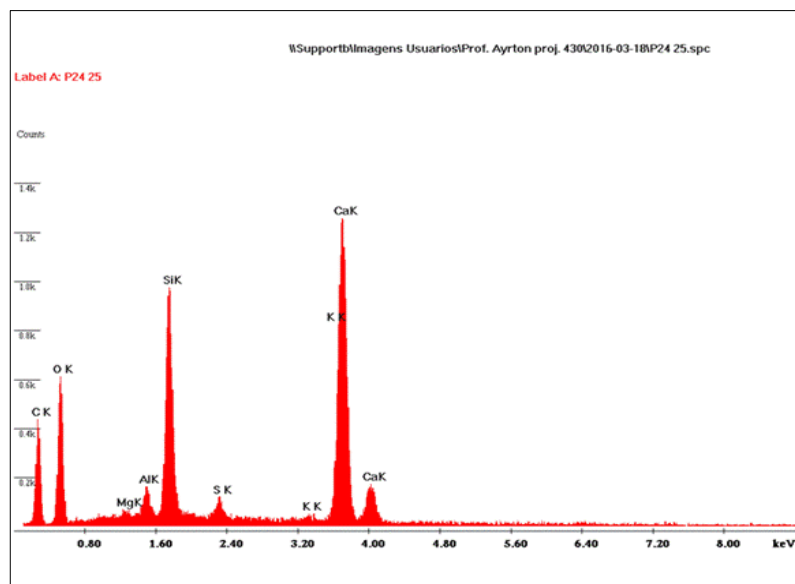
**Figura 4.50** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P24.25– Aumento: 2000x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários), indicando a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente. Seta (S) - presença de cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).



**Figura 4.51** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra P24.25– Aumento: 5000 x  
Obtida por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários). Seta (P) indica a presença de portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e seta (C) carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ).

Pode-se observa nas imagens de MEV, após confirmação das composições por EDS, que os principais constituintes destas amostras também são: a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), o carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ) e a etringita ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), além da presença de trincas, porosidades e ou poros preenchidos por produtos das reações química da pasta cimento.

A Figura 4.52 mostra um dos espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra P24.25 indicando a presença dos elementos químicos: cálcio, sílica, alumina e magnésio, enxofre e potássio, mas com picos de intensidade variando entre as misturas e, também, entre as diferentes granulometrias das amostras.



**Figura 4.52** – Espectrograma de energia dispersiva de raios X (EDS) da amostra P24.25  
Fonte: dados do autor, 2016

## 4.7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Comparando o índice médio obtido na ruptura do corpo-de-prova Padrão MB 01 (55,90 MPa), comprovou-se que a amostra MB 20, uma mistura composta de 10 % de ardósia, 30% de escória e 60% de cimento, que registrou índice médio de ruptura igual a 50,10 MPa, equivale a 89,6% da resistência do corpo-de-prova padrão MB-01. Da mesma forma, o índice de resistência à compressão do corpo-de-prova MB 21 (48,11 MPa),

mistura composta de 20% de ardósia, 20% de escória e 60% de cimento, equivale a 86,1 % da resistência da mistura padrão MB 01.

Nesta pesquisa, os resultados confirmaram que os índices maiores de resistência à ruptura para amostras de argamassa com idade de 28 dias estão relacionados à mistura com maior teor de escória (30%) e menor teor de ardósia (10%), e com a maior granulometria dos compostos e constituintes da amostra MB 20. Mas a amostra MB 21, com 20% de ardósia e 20% de escória, e com a mesma granulometria, obteve índices de equivalência ao Padrão muito próximos dos índices da amostra MB 20, isto é, 86,1%.

Diante destes resultados, técnica e economicamente, acredita-se que a amostra MB 21 atende aos parâmetros determinados nesta pesquisa. Isto porque, ao aumentar a participação da ardósia, diminuindo o teor da escória na mistura, aumenta-se em 10% a participação do teor do insumo mais barato, diminuindo em 10% o teor da escória, com custos de tonelada superiores aos custos da ardósia. Na época da pesquisa, a tonelada da brita de ardósia (00 ou 01) usada nos experimentos foi orçada em R\$ 16,50 preço FOB Papagaios-MG e R\$ 55,00 preço CIF Belo Horizonte-MG. A tonelada da escória de linha fornecida pela IBEC finamente moída foi orçada em R\$ 175,00 preço FOB Matosinhos-MG (Anexo IV), e o cimento a granel registrava o valor de R\$ 380,00 a tonelada preço FOB Pedro Leopoldo - MG.

Quanto às amostras de granulometria mais finas, o custo de cominuição do material, reduzindo de 0,075mm para 0,044mm a dimensão das partículas de ardósia e de escória, implica em agregar mais custo ao produto final. A preparação da brita de ardósia na granulometria de 0,075mm tem um custo aproximado de R\$ 50,00/tonelada. O custo de moagem desse material para maior percentual de passante na peneira 0,044mm tem um custo aproximado de R\$ 400,00 por tonelada, ambas no moinho pendular.

Obtidos estes resultados de resistência a compressão pautados na norma técnica NBR 7215/1996, buscou-se entender, através de ensaios físico-químicos, o comportamento da argamassa composta de mistura ternária de cimento Portland, ardósia e escória de alto forno. Entender, principalmente, a reologia da sua microestrutura após adição dos minerais, destacando o fato de que, inicialmente previam-se melhores

resultados para as amostras com menor granulometria, ao contrário do ocorrido. Afinal, pensou-se que partículas menores teriam mais facilidade de preencher os espaços vazios, com diâmetros da ordem de alguns Angstroms (Å). E preenchendo com maior eficiência estes poros vazios, aumentaria a área das superfícies da pasta cimentícia, desenvolvendo forças de atração de partículas do tipo van der Waals, por exemplo, e não permitindo que a água intersticial se alojasse nestes vazios. Eliminando água e outros elementos perniciosos que se alojam nestes espaços vazios, tais como sais minerais, sulfatos livres, cloretos livres, dentre outros, estará minimizando a atuação das várias formas de deterioração da argamassa ao longo do tempo, que interferem no desenvolvimento de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente, como documentado nas fotomicrografias obtidas no MEV, expostas anteriormente.

A argamassa, como também o concreto, absorve água num ciclo migratório, água de vaporização, por exemplo, e quando esta água é absorvida pela massa, ela não terá espaço vazio para se acomodar. Uma água parada, acomodada dentro de uma microestrutura da argamassa, torna-se uma agente deteriorante e facilita a perda da durabilidade e perda de empenho, interferindo na vida útil do sistema. Daí a necessidade de minimizar a presença de água nestes poros, num ciclo migratório de absorção natural alimentada por estas estruturas, estendendo a vida útil desta estrutura. E para isto, quanto menos vazios existirem na pasta, menos espaços existirão para serem ocupados por materiais deteriorantes. O aumento desta vida útil traduz-se em aumento de durabilidade, que significa a manutenção de desempenho, de performance ao longo da idade da argamassa.

Neste contexto, a ardósia moída não atua como pozolana, mas sim como ativador para facilitar a atração de forças de van der Waals à matriz cimentícia, amoldando os micro cristais nos espaços (modelagem dos cristais). E neste caso, não é somente o tamanho das partículas que vai preencher o espaço vazio, mas também a morfologia das partículas. A ardósia não é material cimentício, mas sim material de enchimento, conhecido como filer. Um filer é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland. O preenchimento dos poros pelo filer irá diminuir esses poros vazios, diminuindo a porosidade e, conseqüentemente, aumentando a durabilidade da argamassa.



Para melhor entender esta reologia, foram desenvolvidos ensaios de Fluorescência de Raio-X, Difratomia de Raios-X, Determinação de Área Superficial por Método BET e Microscopia Eletrônica de Varredura–MEV, conforme abordados ao longo deste Capítulo 4.

Pela difratometria, comprovou-se que a fração da escória de alto forno utilizada na pesquisa evidenciou seu elevado estado amorfo, em torno de 96%, o que é raro para estes materiais, tornando-se importante levantar a reação pozolânica. Já os difratogramas da fração ardósia com granulometrias passante na peneira 0,075mm e 0,044mm são idênticos e evidenciaram o seu estado cristalino.

Fotomicrografias das superfícies de rupturas das amostras obtidas por MEV no modo BSE (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários), realizadas na UFMG, e fotomicrografias no modo SE (elétrons secundários) processadas na empresa Phosther Agregados Ltda., permitiram identificar como constituintes importantes a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), o carbonato de cálcio em formação ( $\text{CaCO}_3$ ), a etringita ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Além destes, destacam-se outras estruturas como fissuras abertas ou preenchidas, poros preenchidos por produtos das reações química da pasta cimento, aglomerados de partículas finas espalhados sobre a superfície ou na entrada dos espaços vazios e muitos outros. Através desta identificação, inúmeras discussões abordadas por muitos pesquisadores sobre o tema tendem a validar os resultados aqui obtidos e descritos.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), “*a microestrutura do concreto não é uma característica intrínseca do material*”. Isto porque a “*pasta de cimento hidratada e a zona de transição na interface estão sujeitas a alterações com o tempo, a umidade e a temperatura ambiente*”.

Para estes autores, como resultado da interação inicial entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxilas e a hidratação do cimento, surgem os cristais aciculares de etringita, compostos de trissulfoaluminato de cálcio hidratado ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), num tempo de aproximadamente 3 a 7 dias. Em seguida, horas após segundo esses autores, os espaços

vazios, inicialmente ocupados por água e partículas de cimento em dissolução, começam a ser preenchidos por grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), a portlandita, e pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A portlandita cristaliza-se a partir da hidratação dos silicatos.

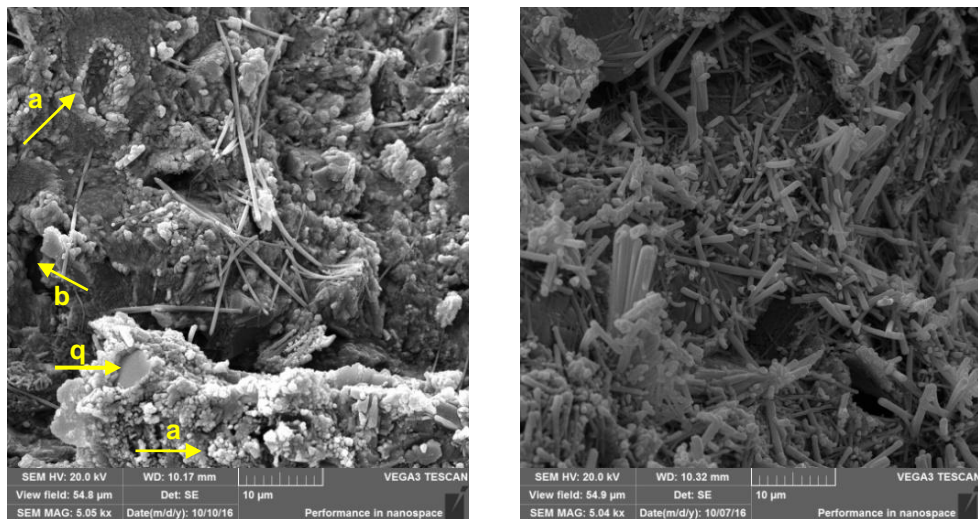
Portanto, durante os estágios iniciais da hidratação da pasta de cimento, a relação iônica sulfato/alumina da solução geralmente favorece a formação de etringita (sulfoaluminatos de cálcio -  $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), na forma de cristais prismáticos aciculares. É, normalmente, o primeiro hidrato a se cristalizar devido a esta alta relação iônica na fase aquosa durante a primeira hora da hidratação.

As fotomicrografias representadas nas Figuras 4.27 e 4.28 aparentemente mostram que a estrutura está evoluindo mais lentamente, como se os resíduos (as adições) estivessem retardando a formação de etringita. Tem-se etringita bem formada, mas não em quantidade. É como se estivesse mais madura. A evolução do sistema está diferente, demonstrando que o material tem uma estrutura muito mais compacta e está envelhecendo mais rapidamente, caracterizando uma estrutura de envelhecimento. Ele absorve a água de hidratação, passa acelerado por este estágio e no final ele vai obter uma estrutura de mais alta performance. As fotomicrografias do MEV, que apresentaram uma estrutura compacta, tipo de argamassa rígida, caracteriza ser de baixa porosidade. E isto repercute elevando a performance.

As fotomicrografias de duas superfícies de ruptura da amostra MB 25 (28 dias) e aumento de 5480x representadas na Figura 4.53, obtidas no microscópio eletrônico de varredura no modo SE (elétrons secundários), processado no VEGA3 TESCAN da Phosther, mostram cristais aciculares de etringita muito bem desenvolvidos, espalhados pela superfície ou entrelaçando-se nas entradas dos poros vazios ou semipreenchidos. Estas agulhas entrelaçadas podem prender água, prejudicando sua trabalhabilidade, gerando a falsa pega, segundo Freitas Junior (2013).

Ainda na Figura 4.53, tem-se aglomerados de partículas (seta a) na forma esférica, no interior de poros, e nas entradas dos poros vazios (seta b) tem-se C-S-H impedindo o

preenchimento destes espaços vazios e minimizando, pontualmente, a formação de superfícies compactas, além da existência de cristais de portlandita e quartzo (seta q).



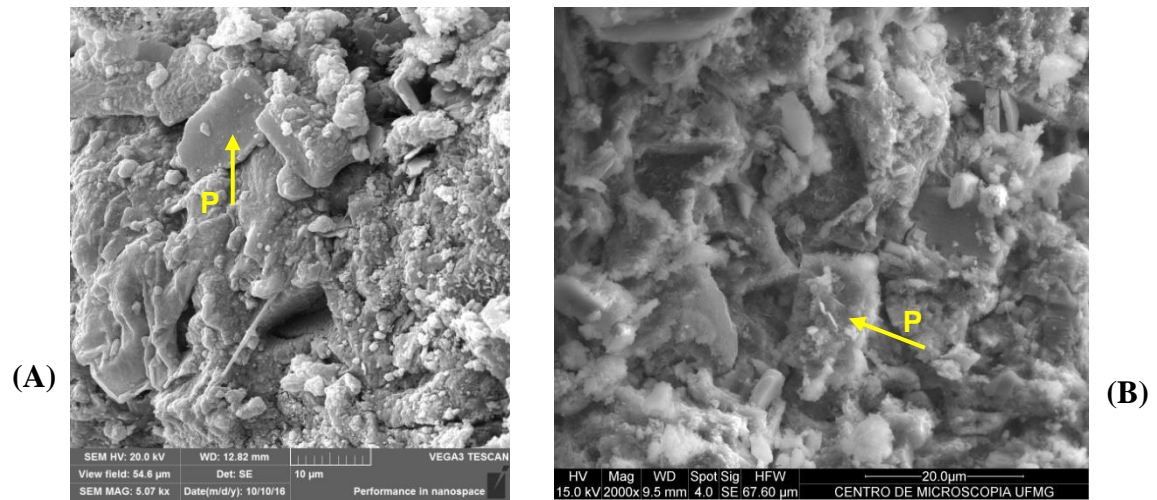
**Figura 4.53** - Fotomicrografia de duas superfícies de ruptura da amostra MB 25 -aumento de 5480x  
Fonte: dados do autor, 2016

A fase silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) é importante por determinar as propriedades de uma pasta de cimento hidratada, sendo responsável pelas resistências mecânicas da pasta. A resistência do material é atribuída, principalmente, às forças de van der Waals. Para Mehta e Monteiro (2008), apoiados no modelo de Feldman-Sereda, a estrutura de C-S-H é representada como um arranjo irregular ou dobrado de camadas dispostas aleatoriamente, criando espaços interlamelares de diferentes formas e tamanhos.

Já os cristais de portlandita (hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ ) presentes nas amostras MB 20 (imagem B) e MB 21 (imagem A) compondo a Figura 4.54, formam grandes cristais com morfologia prismática hexagonal distinta, que podem ser afetados pela disponibilidade de espaço, temperatura de hidratação e impurezas. A portlandita apresenta limitada contribuição à resistência devido à baixa área superficial.

Nesta Figura 4.54, a imagem (A) refere-se à amostra MB 21 com idade de 14 dias, com aumento de 5480x e processada na empresa Phosther. A imagem (B) refere-se à amostra MB 20 (14 dias), com aumento de 2000x e processada na UFMG. A seta (P) refere-se a cristais de portlandita, hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ . Observa-se que ambas as amostras,

passantes na peneira 0,075mm, com 14 dias, apresentam grande intensidade de vazios capilares.



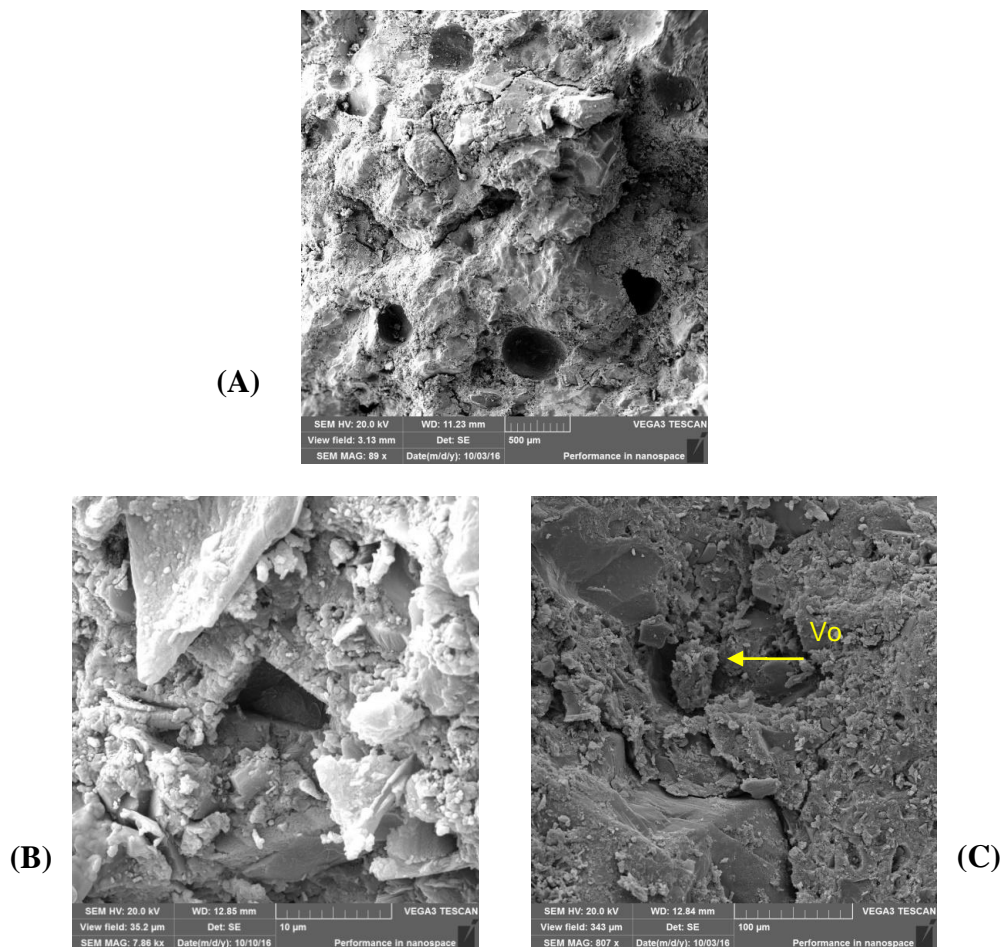
**Figura 4.54** - Fotomicrografia de superfície de ruptura obtidas por MEV no modo SE (elétrons secundários).  
Fonte: dados do autor, 2016

Freitas Junior (2013) acrescenta que a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) é muito solúvel em água, é quimicamente muito reativa, e os cristais são porosos com baixa resistência mecânica.

A pasta de cimento hidratada possui, além dos sólidos, muitos tipos de vazios ou espaços lamelares, importantes por influenciar as propriedades da pasta. São espaços não preenchidos pelo cimento ou pelos produtos de hidratação. O volume e o tamanho desses vazios são determinados pela distância original entre as partículas de cimento anidro na pasta de cimento no estado fresco e o grau de hidratação do cimento. As propriedades da pasta de cimento hidratada dependem das características microestruturais, isto é, do tipo, da quantidade e da distribuição de sólidos e vazios. Os vazios são considerados importantes no comportamento das forças de atração van der Waals,

As imagens (A), (B) e (C) da Figura 4.55, mostram tipos de poros vazios formados por processos diferentes, presentes na superfície de ruptura das amostras MB 25 (A), passante na peneira 0,044mm e com idade de 28 dias, e MB 21 (B) e (C) passante na peneira 0,075mm, com idade de 14 dias. Em (A), os vazios arredondados caracterizam

vazios de ar ou água. Em (B) tem-se vazios capilares e cristais hexagonais de portlandita, e em (C) um vazio obstruído (seta  $V_o$ ) por uma partícula que impede o empacotamento por partículas no poro.

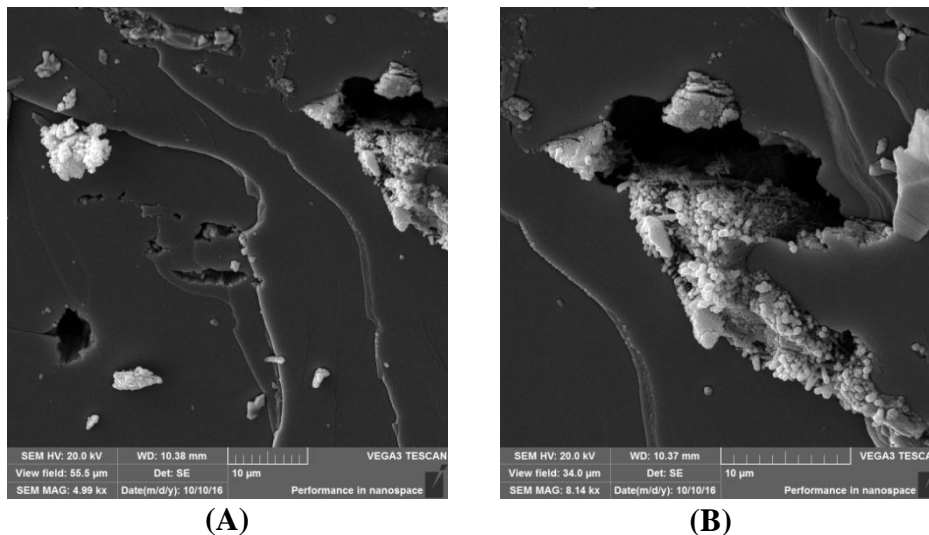


**Figura 4.55** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 25 (A) e MB 21 (B e C)  
Fonte: dados do autor, 2016

Na Figura 4.55, a imagem A da amostra MB 25 (28 dias) apresenta aumento 3.130 x, e a imagem B da amostra MB 21 (14 dias) um aumento de 3.520 x, obtidas por MEV no modo SE (elétrons secundários), VEGA3 TESCAN.

Costa A. (2016) registrou que a matriz da pasta de cimento hidratada e a zona de transição na interface matriz-agregado, geralmente apresentam uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras. A Figura 4.56, obtida por MEV no modo SE (elétrons secundários), no microscópio eletrônico de varredura VEGA3 TESCAN, mostra a pasta de cimento da amostra Padrão, com idade de 28 dias, com microfissuras e vazios apresentando

intercrescimento de partículas aglomeradas e, no fundo da microcavidade, agulhas de etringita. Estas agulhas estão mais nítidas na imagem (B), que é detalhe da imagem (A).



**Figura 4.56** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra Padrão (28 dias) – Aumento: 5.550 x (A) e 3.400 x (B)

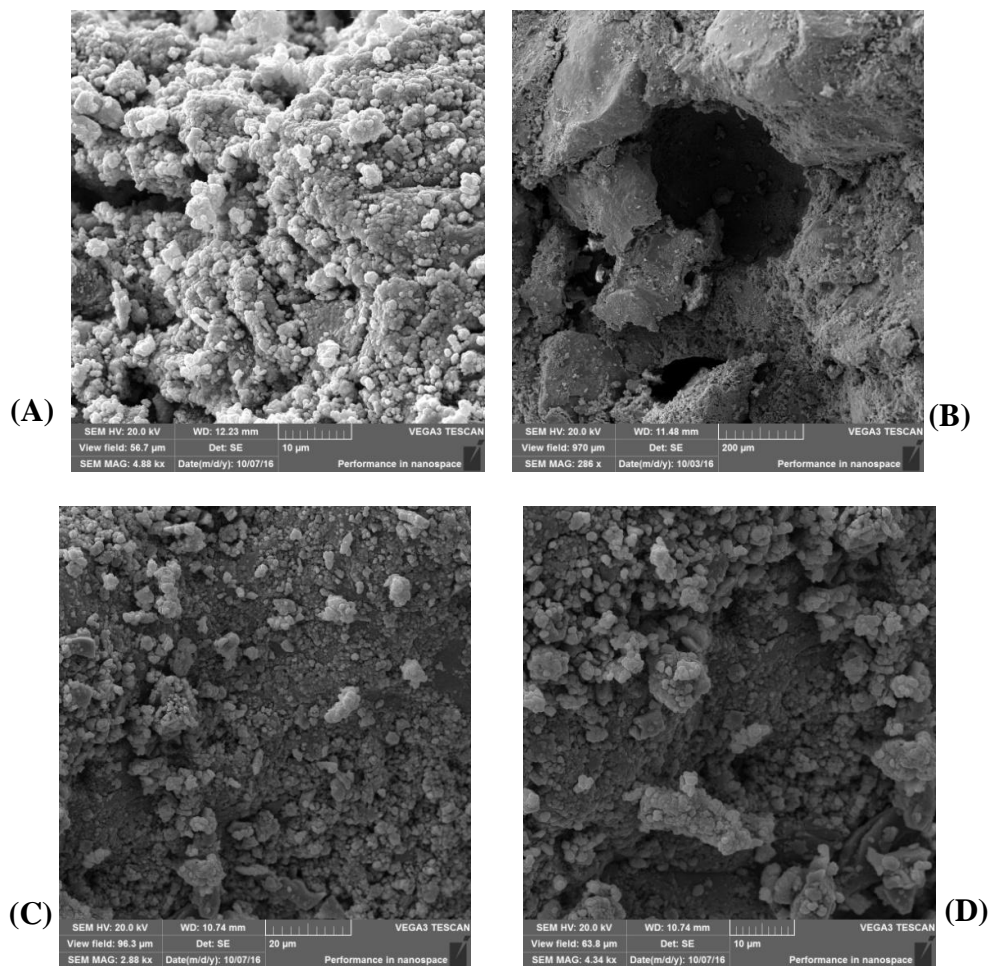
Fonte: dados do autor, 2016

Mehta e Monteiro (2008) escrevem que “*deve-se observar que a principal fonte de resistência nos produtos sólidos da pasta de cimento hidratada é a existência das forças de van der Waals*”, que são responsáveis pela aderência entre duas superfícies sólidas, sendo o grau da ação adesividade dependente da extensão e da natureza das superfícies envolvidas. Daí, sabendo-se que a resistência se encontra na parte sólida de um material, conclui-se que os espaços vazios são prejudiciais à resistência. E o volume de vazios capilares depende da quantidade de água de mistura adicionada ao cimento no início da hidratação.

Segundo Freitas Junior (2013), quanto maior a relação água/cimento (*a/c*), maior a quantidade de poros capilares e maiores os seus diâmetros, sendo que poros com  $\emptyset$  inferiores a 500Å não afetam a resistência mecânica, mas provocam forte retração com a saída da água. Já os poros com  $\emptyset$  superiores a 500Å prejudicam a resistência mecânica, mas não causam muita retração com a saída da água.

Castro e Pandolfelli (2009) registraram que os vários tipos de interação, dentre elas “*as forças de atração interpartículas (forças de van der Waals), forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e a forte interação ou ligação envolvendo as*

*moléculas de água ou hidratos*”, fazem com que as partículas de cimento, quando entram em contato com a água, apresentem uma grande tendência à aglomeração. A Figura 4.57, composta pelas imagens A, B, C e D, apresenta fotomicrografias da superfície de ruptura da amostra MB 24, com idade de 28 dias e passante na peneira 0,044 mm, obtida por MEV no modo SE (elétrons secundários). Estas imagens mostram a superfície com partículas finas formando estruturas aglomeradas esféricas e elevada incidência de espaços vazios. Muitos destes aglomerados encontram-se nas bordas ou sobre a cavidade dos poros, com dimensões superiores ao diâmetro de entrada do poro, impedindo que ocorra o empacotamento destes espaços vazios neste ponto. Estas partículas, se estivessem dispersas, individualizadas, caberiam facilmente no interior destes poros, formando neste ponto uma superfície mais adensada, com partículas mais coesas, aumentando a sua resistência mecânica.



**Figura 4.57** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 24.

Contem aglomerados de partículas e presença de vazios preenchidos parcialmente.

Fonte: dados do autor, 2016

Os aumentos das imagens correspondem à: 4.880x para a imagem (A), 28.600x para imagem (B), imagem (C) com aumento de 2.880 x e a imagem (D) com aumento de 4.340x.

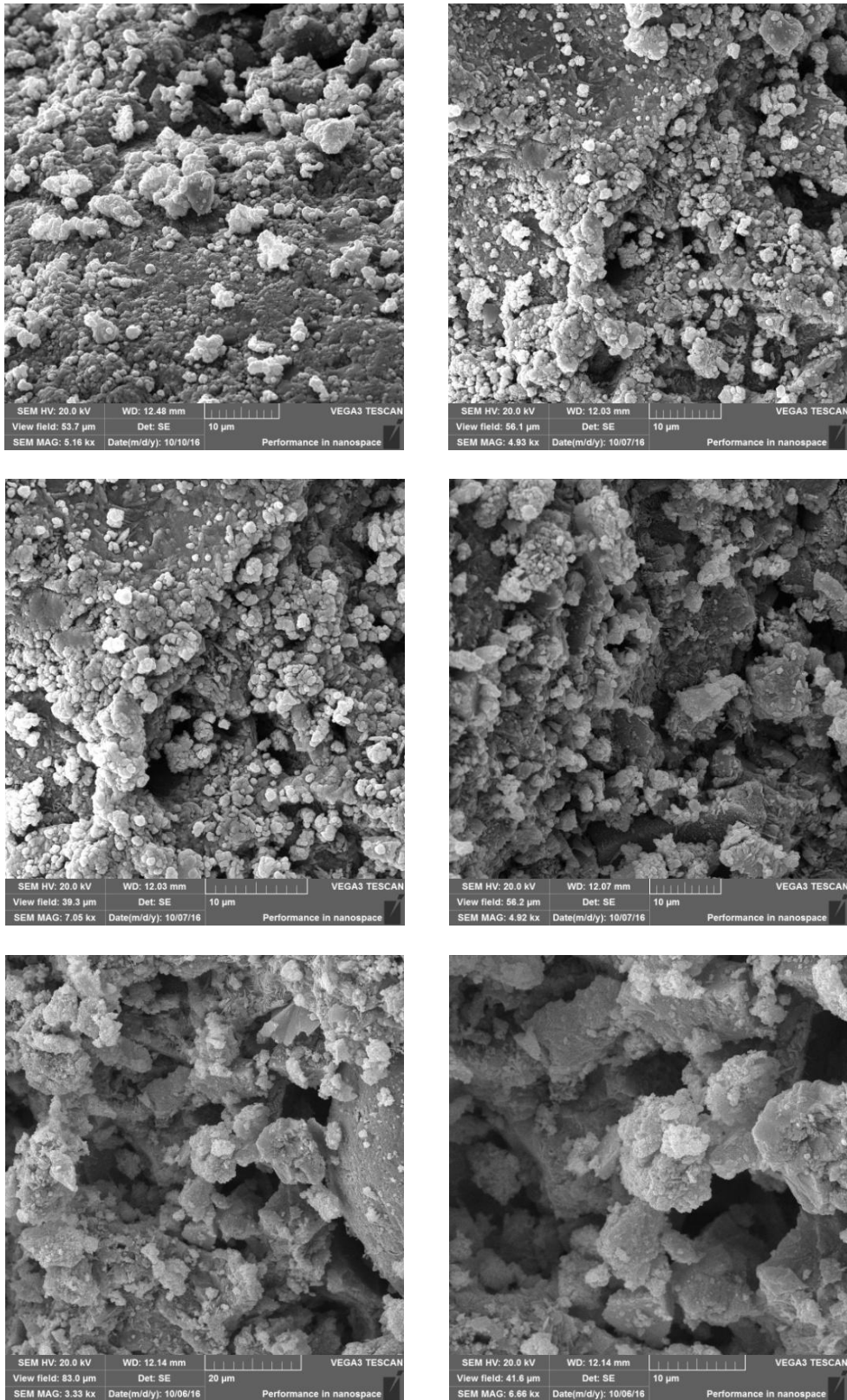
É importante lembrar que, no MEV, é possível observar uma porosidade da ordem de micrometros concentrada em um ponto da amostra. Daí, não é aconselhável generalizar definindo que a superfície de ruptura da amostra é constituída somente de partículas aglomeradas. Deve-se observar que muitas fotomicrografias obtidas no MEV e presentes no Capítulo 4.6 (Figuras 4.11 a 4.52), indicam a presença de uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente para todas as amostras analisadas, incluindo as amostras Padrão.

Repetindo Castro e Pandolfelli (2009), o estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores sucessivamente. Para eles, os componentes das adições, finos e ultrafinos, com formato esférico, têm sido adicionados às misturas tanto para facilitar o autoadensamento, quanto para garantir uma melhor compactação e preenchimento dos vazios existentes entre os grãos, aumentando ainda mais a densidade desses materiais.

Da mesma forma, a Figura 4.58, constituída de seis imagens de fotomicrografias da superfície de ruptura da amostra MB 20, com idade de 14 dias, passante na peneira 0,075mm, registra pontualmente aglomerados de partículas muito finas, da ordem de micrometros, formando uma estrutura esférica e, também, grande quantidade de poros vazios ou parcialmente preenchidos por estes aglomerados.

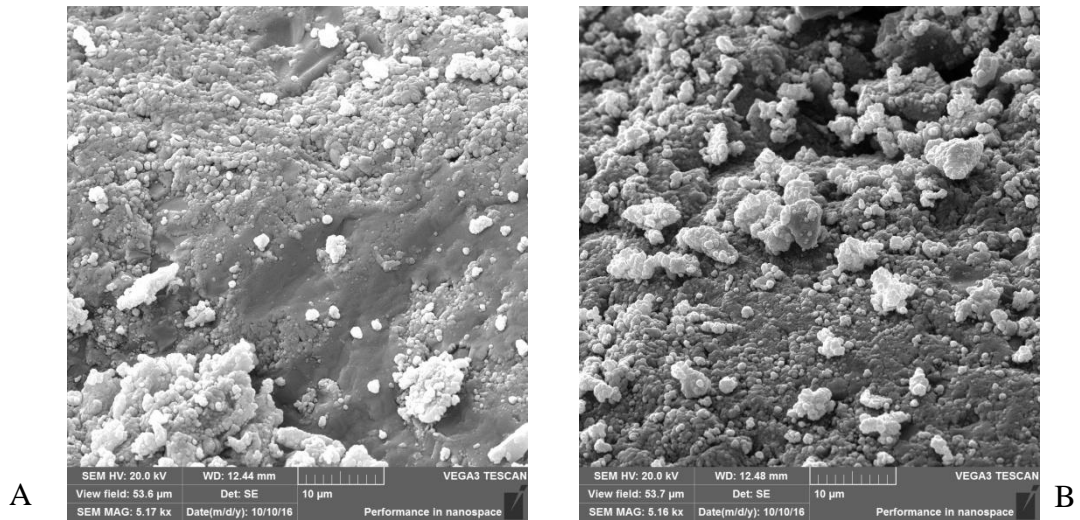
Formam superfícies enrugadas no ponto analisado, ainda evidenciando resquícios das formas iniciais das partículas e grande incidência de partículas dispostas sobre estas superfícies, com a aparência pulverulenta, como se estivessem soltos aleatoriamente, como grânulos.





**Figura 4.58** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra MB 20 (14 dias, 0,075mm)  
São imagens obtidas por MEV no modo SE (elétrons secundários) – Aumentos variando de 8300x a 3.900x. VEGA3 TESCAN. Tem-se aglomerados de partículas, na forma esférica, e presença de grande intensidade de poros vazios ou preenchidos parcialmente. Fonte: dados do autor, 2016

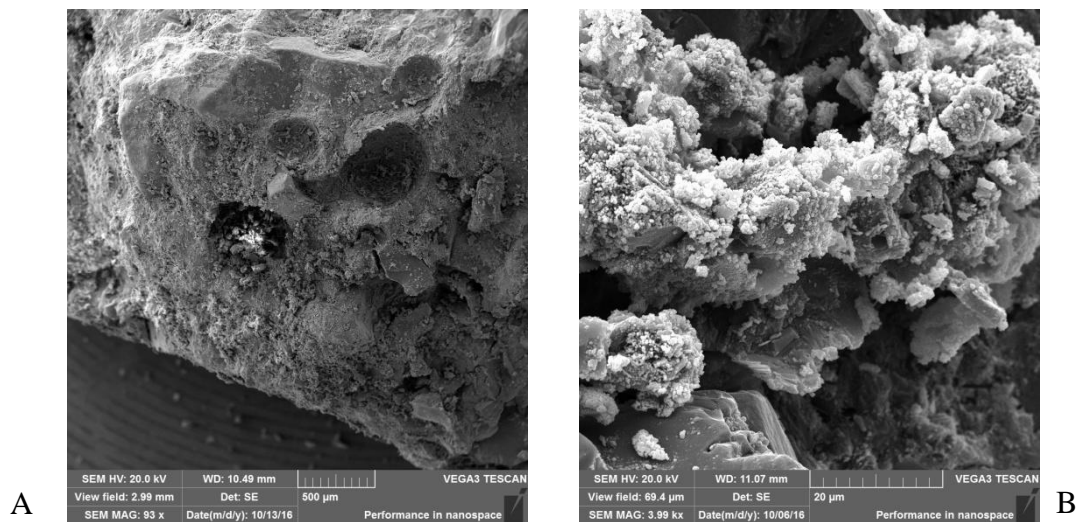
As Figuras 4.59 e 4.60 apresentam microestruturas captadas nas amostras Padrão, evidenciando semelhanças pontuais com as amostras constituídas com adições de ardósia e escória de alto forno.



**Figura 4.59** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra Padrão (14 dias, 0,075mm).

Obtida por MEV no modo SE (elétrons secundários) – Aumentos: imagem (A) ampliada 5.360x e imagem (B) ampliada 5.370x. VEGA3 TESCAN. Em (A) predomina pontualmente uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente, mas com aglomerados arredondados. Em (B), maior presença de aglomerados de partículas, além de poros preenchidos e poros vazios.

Fonte: dados do autor, 2016



**Figura 4.60** - Fotomicrografia da superfície de ruptura da amostra Padrão (28 dias, 0,044mm).

Obtida por MEV no modo SE (elétrons secundários) – Aumentos: imagem (A) ampliada 2990x e imagem (B) ampliada 6940x. VEGA3 TESCAN. Em (A) predomina pontualmente uma estrutura compactada e típica de argamassa rija e resistente, mas com microestruturas de vazios de ar, tipo vesículas ou bolhas. Em (B), maior presença de aglomerados de partículas, além de espaços vazios e pertlandita. Fonte: dados do autor, 2016

Observa-se que tanto a amostra Padrão com idade de 14 dias (passante na peneira 0,075mm), como a amostra Padrão com idade de 28 dias (passante na peneira 0,044mm), sem adição de ardósia e escória, e sem aditivos dispersantes, apresentaram estruturas compactas e típicas de argamassa rija e resistente, mas, também mostraram a existência de aglomerados de partículas, espaços vazios, bolhas caracterizadas pela expulsão de água ou ar, fissuras e superfícies rugosas ou ásperas, dentre outras estruturas características.

Estas imagens registradas na Figura 4.57 até a Figura 4.60 corroboram com as afirmativas dos autores Castro e Pandolfelli (2009) sobre a influência desta estrutura nos vários tipos de interação entre as partículas, dentre elas “*as forças de atração interpartículas, forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e a forte interação ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratos*”, conforme citado anteriormente.

Quando forças de atração de van der Waals são dominantes entre as partículas, o conjunto resulta na atração e as partículas tendem a aglomerar. Porém, na presença de aditivos superplastificantes, o conjunto resulta na repulsão e as partículas permanecem separadas.

Assim, nesta pesquisa de doutorado esperava-se que os finos de ardósia e da escória deveriam atuar como filer, preenchendo esses vazios capilares e aumentando a área superficial e, conseqüentemente, possibilitando a atuação das forças de van der Waals em favor do aumento da resistência da pasta de cimento hidratada à ruptura. Mas, na prática, obteve-se valores de resistências à ruptura na compressão inferiores aos valores de resistência das amostras Padrão e, também, áreas superficiais específicas (SBET) maiores que das amostras Padrão, caracterizando maior porosidade desta superfície específica das amostras com mistura ternária em comparação à porosidade das amostras Padrão.

O entendimento deste cenário fluiu através das fotomicrografias obtidas nos ensaios de MEV, quando foi observada elevada incidência de espaços vazios na microestrutura da argamassa composta e, da mesma forma, a existência significativa de aglomerados de

partículas, sendo muitos deles posicionados nas entradas dos poros, não preenchendo totalmente esses espaços vazios. Isto contribui para justificar o fato dos valores de ruptura das amostras com adições ternárias terem sido 10% menores que os valores de ruptura da amostra Padrão obtidos nos ensaios de resistência à compressão. E, também, explica o registro dos valores de superfície específica (SBET) maiores para amostras com adição de ardósia e escória comparativamente às amostras Padrão. O valor de resistência à compressão desta argamassa com adição totalizou 50,10 MPa.

Estas evidências, acredita-se, reforçam a importância do uso de dispersante das partículas com o fim de interferir na reologia microestrutural da argamassa, produzindo a dispersão e conduzindo estas nano partículas na forma de filer para o interior dos vazios, tamponando-os e tornando a superfície da pasta cimentícia menos porosa e, portanto, mais resistente devido às forças de coesão atuantes no processo.

Os parâmetros que afetam mais significativamente a área superficial são o tamanho das partículas, a porosidade e a rugosidade da superfície das partículas. Sendo rugosa, a área superficial é maior.

Os resultados dos ensaios de BET, levantando a área superficial específica (SBET) mediu, possivelmente, mais porosidade e rugosidade, pois nas fotomicrografia não se viu material granulado, mas sim material pulverulento, pó e coloides. Então, indiretamente, a área superficial específica mediu a porosidade das amostras.

Assim, em relação à amostra Padrão, as amostras com adição de ardósia e escória resultaram maior porosidade. Uma porosidade que está abaixo do visto no MEV. Isto é, são porosidades micro e meso poro, da ordem de alguns Angstroms.

E a repercussão desta situação reflete no momento em que o material mais fino é adicionado e ele passa a absorver mais água, gerando mais forças de ligação de van der Waals. Com isto, são gerados mais aglomerados de partículas, que terão mais dificuldade para penetrar e preencher o interior dos espaços vazios, dificultando o empacotamento de partículas no interior destas estruturas da massa cimentícia.

Por este motivo, a resistência mecânica diminui, pois tem-se mais espaço vazio na argamassa e maior intensidade de aglomerados de partículas, caracterizando maior porosidade. E para diluir estes aglomerados tem-se que introduzir o agente tensoativo, que irá aumentar a molhabilidade do sistema, fazendo com que mais água entre na reação.

Diluindo os aglomerados, as partículas já individualizadas tendem ao enchimento, ao empacotamento dos espaços vazios. Preenchendo esses poros, diminui a porosidade, aumenta a coesão das partículas que molduram a superfície e, conseqüentemente, aumenta a resistência à ruptura por compressão, tendo como referência a norma NBR 7215/1996.

E, diante de uma diferença de resistência à ruptura de apenas 10% da amostra Padrão nos ensaios desta pesquisa, acredita-se que, com aditivos dispersantes, esta resistência à compressão deverá ser superior, igualando ou até ultrapassando os valores de resistência da amostra Padrão. E, assim, justificando técnica e economicamente o desenvolvimento desta pesquisa de doutorado ao agregar valor ao resíduo de um bem mineral importante para uma região do Estado de Minas Gerais.

Na pesquisa, esse novo produto, uma argamassa com idade de 28 dias, composta de adição ternária de cimento Portland, ardósia e escória finamente moídas, testada em várias dosagens destes insumos, atingiu valor de resistência à compressão de 50,10 MPa (MB 20), equivalente a 89,6% do índice de resistência da amostra Padrão, sem aplicar no processo nenhum aditivo para desaglomerar as partículas das adições. Este maior valor foi seguido de amostras rompidas com 48,11 MPa (MB 21) e 44,47 MPa (MB 23). Dentre os demais resultados, os menores índices de resistência a compressão obtidos na pesquisa atingiram 10,32 MPa (MB 12), seguido de 15,07 MPa (MB 13) e 15,67 MPa (MB 03), todos compondo a Figura 4.1.

Ressalta-se nesta discussão que a pesquisa não desenvolveu uma mistura pensando em estudar uma super adição, comparando com adições de metacaulim, microsíllica ou sílica ativa, por exemplo. Buscou, sim, estudar uma mistura com adição de resíduos da

rocha ardósia na forma de um rejeito de mineração tradicionalmente descartado na natureza ou em lotes vagos na região produtora.

Segundo Neville e Brooks (2013), no Brasil, para os cimentos CP I, CP II, CP III e CP IV ensaiados aos 28 dias, as normas técnicas estabelecem 03 classes de resistência à compressão: 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa. Na Europa, para os mesmos 28 dias, a norma BS EN 197-1:2000 (corpos de prova na forma de prismas de argamassa) estabelece 06 classes de resistência para os 06 tipos de classes de cimento (cimentos de crescimento de resistência normal e cimentos com propriedades de alta resistência inicial). Assim, as respectivas classes de resistência para estas 06 classes de cimento variam entre 32,5 MPa, 42,5 MPa, 52,5 MPa e 62,5 MPa.

Ainda, segundo esses autores, nos Estados Unidos a ASTM C 109-05 (cubos de argamassa) define que os procedimentos de mistura e moldagem de uma argamassa são semelhantes aos prescritos pela norma europeia BS EN 197-1:2000. Correspondem a 08 classes de cimento e suas resistências à compressão variam entre 17 MPa, 21 MPa, 22 MPa e 28 MPa

O catálogo de produtos da empresa CIMPOR (2017)<sup>15</sup>, sediada em Lisboa – Portugal, , pioneira na produção e comercialização de argamassas secas em granel em Portugal, , apresenta as especificações técnicas das várias formulações de argamassas para reboco e revestimento, para assentamento de alvenaria, para pavimentos, dentre outras. Os índices de resistência à compressão das argamassas de assentamento de alvenaria e argamassas para pavimentos mostram valores muito inferiores aos resultados obtidos na pesquisa em estudo, apresentados na Figura 4.1 e Tabelas 4.1 e 4.2. As especificações dos vários tipos de argamassas para assentamento de alvenaria da CIMPOR apresentam índices de resistência à compressão variando de  $\geq 5$  MPa,  $\geq 7,5$  MPa e  $\geq 10$  MPa. As especificações das argamassas para pavimentos apresentam índices de resistência a compressão da ordem de  $\geq 7$  MPa,  $\geq 12$  MPa,  $\geq 16$  MPa e  $\geq 20$  MPa.

A CIMPOR tem como referencia a Norma Europeia EN 998-2 ed. 3 Especificação para argamassa para alvenaria - Parte 2: Argamassa de alvenaria (*CSN EN 998-2 ed. 3 -*

---

<sup>15</sup> Disponível em: < <http://www.cimpor-portugal.pt> >. Acesso em: 27 maio 2017

*Specification for mortar for masonry - Part 2: Masonry mortar*). Esta norma especifica os requisitos para as argamassas de alvenaria fabricadas em fábrica para uso em paredes, colunas e divisórias de alvenaria.

Assim, finalizando a discussão sobre este estudo, ressalta-se que os índices de resistência à compressão de todas estas misturas ternárias, obtidos nesta pesquisa (Figura 4.1), surpreenderam ao comparar os máximos e os mínimos valores às normas nacionais e internacionais. Os valores máximos encontrados caracterizam um produto com índices de resistência superiores aos índices estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras para as 03 classes de resistência à compressão no valor de 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa, conforme Neville e Brooks (2013). Já os valores inferiores são uma caracterização física de cimento de alvenaria largamente empregada na Comunidade Europeia e nos Estados Unidos. Isto significa que este novo produto desenvolvido nesta pesquisa, compreendendo uma mistura ternária de cimento, ardósia e escória de alto forno finamente moídas, apresenta vários traços viáveis tecnicamente e com custos inferiores ao processo tradicional, motivado pela substituição de parte do cimento Portland por insumos de menores custo por tonelada. Os produtos de menores índices de resistência, comparativamente às normas europeias, podem ser usados na produção de chapisco, reboco, emboço, assentamento de alvenaria convencional e alvenaria de vedação, contra-piso, dentre outros. Normas estas não praticadas oficialmente no Brasil já que desconsideram estes traços como resistência de parâmetro de norma.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

### **5.1 CONCLUSÕES**

Antes de consolidar argumentos pautados em conceitos econômicos acerca do emprego dos resíduos de ardósia na composição de produtos industriais, é necessário desenvolver estudos que definam a viabilidade técnica deste novo produto.

Após caracterizar física e quimicamente os materiais constituintes da mistura ternária em estudo, de identificar os índices de resistência à compressão desta mistura em suas diferentes dosagens, e de explicar o comportamento dos índices de resistência à compressão a partir do entendimento microestrutural dos corpos de prova das respectivas misturas, foi possível analisar e avaliar o comportamento da argamassa produzida a partir de mistura ternária constituída de cimento Portland, ardósia e escória de alto forno finamente moídas, sem o uso de aditivos dispersantes. Os ensaios de resistência a compressão foram desenvolvidos em consonância com a norma técnica ABNT/NBR 7215/1996,

Os resultados auferidos deste estudo demonstram que os parâmetros perseguidos nesta pesquisa, alicerçados na viabilidade técnica e econômica, foram alcançados. Mas sugerem a continuidade dos trabalhos, principalmente visando pesquisar novos traços desta argamassa. E, neste caso, acrescentar estudos a cerca da influência do aumento do fator água-cimento no sistema, além da inclusão de dispersantes ou outros aditivos.

Estes novos traços poderão resultar argamassas de menor comportamento mecânico do ponto de vista de resistência à compressão, mas tecnicamente aprovadas para uso como argamassa para reboco ou argamassa de revestimento, dentre outros usos comuns na Europa e Estados Unidos. A Figura 4.1 apresenta um gráfico representando os índices de resistência das 21 amostras ensaiadas na pesquisa. Destas 21 amostras, sendo uma a amostra padrão, 11 registraram valor superior a 25 MPa. Este valor é definido como limite para a menor das 03 classes de resistência à compressão normatizadas no Brasil pelo segmento cimentício. As demais 10 amostras registraram índice de resistência a



compressão variando de 10,32 MPa a 24,84 MPa. Estas amostras com índices inferiores a 25 MPa não são normatizadas no Brasil mas, com base nas normas europeias e americanas, colocam-se aptas para uso como argamassas de menor solicitação.

Assim a pesquisa aponta, também, para a possibilidade de definição de novas resistências à compressão com parâmetro de norma, aliadas ao ganho econômico com a diminuição do cimento Portland e respectiva adição do resíduo de ardósia na mistura. Nesta mistura ternária, o cimento Portland é o insumo de maior custo a tonelada, enquanto a brita de ardósia apresenta-se como o insumo de menor custo.

Finalizando, conclui-se que a fase de testes de laboratório apresentou resultados positivos, confirmando a possibilidade de se empregar os resíduos de ardósia e escória de alto forno, micronizados, como adição mineral na argamassa em substituição parcial do cimento Portland. A influência desta adição de rejeitos de ardósia no comportamento desta mistura ternária é positiva tecnologicamente.

Os resultados obtidos nos ensaios de ruptura dos corpos de prova foram importantes na pesquisa, consolidando a possibilidade de desenvolver outros estudos científicos e tecnológicos visando validar a aplicação de preceitos de geotecnia para a definição do uso futuro deste novo produto cimentício. E no contexto de uma região dependente economicamente da extração deste bem mineral, marcada pelos significativos impactos ambientais e sociais, esse projeto reveste-se de elevada importância quanto a sua inserção social, ambiental e econômica nesta região caracterizada como o maior polo produtor e beneficiador da rocha ardósia no país. Os resultados da pesquisa contribuem com a possibilidade de harmonização desse setor extrativo técnica e economicamente com a preservação do nosso meio ambiente, agregando valor ao rejeito da extração e beneficiamento, gerando novos empregos e mais desenvolvimento regional.

## **5.2 RELEVÂNCIA DA PESQUISA**

A ardósia é um mineral industrial, cuja sua principal aplicação é na construção civil como placas de revestimento (pisos e parede), bancadas, móveis, artesanatos, dentre outros.

As lavras de ardósia registram aproveitamento de material extraído em torno de 10%. O restante, aproximadamente 90%, são considerados rejeitos, constituídos de blocos, cacos, aparas, pó e o solo originado da alteração da rocha ardósia, que são descartados no meio ambiente de forma não conforme com a legislação ambiental em vigor. Nas serrarias e marmorarias, predominam como rejeitos as aparas e a lama contendo partículas de ardósia micronizada.

Em 2001, o autor desenvolveu pesquisa no laboratório de uma fábrica de cimento visando a utilização do resíduo de ardósia na farinha do clínquer, em substituição à argila, numa proporção de 85% de calcário e 15% de brita de ardósia. Os resultados desta pesquisa foram aprovados por esta indústria de cimento e pela Associação Brasileira de Cimento Portland-ABCP.

Recentemente, de acordo com registros da Fundação Estadual de Meio Ambiente-MG (FEAM, 2014), esta fábrica em Pedro Leopoldo-MG tem usado brita de ardósia na constituição do cimento CP IV e CPII.

A partir deste trabalho pioneiro de aplicação de resíduos de ardósia na indústria, outras pesquisas foram e estão sendo desenvolvidas com o objetivo de minimizar o impacto provocado pelo descarte desses rejeitos no meio ambiente, além de agregar valor a este bem mineral.

Com o mesmo objetivo, sabe-se que o concreto de cimento Portland é o material de construção mais utilizado no mundo, mas seu uso está associado a elevado custo ambiental. Segundo Sales (2014)

*[...] A extração de bilhões de toneladas de recursos naturais para sua fabricação impacta fortemente o meio ambiente. Além disso, a produção de cimento Portland requer alto consumo de energia, além de produzir grande quantidade de dióxido de carbono, que é liberado na atmosfera .*

Diminuir o consumo do cimento nas obras de engenharia implica em diminuir o gasto com energia e outros insumos, prejudiciais ao meio ambiente.

Economicamente, a substituição do cimento, considerado o insumo mais caro no processo de fabricação de uma argamassa sem aditivos, por adições minerais compatíveis e com custo inferior ao cimento, implica em redução dos custos no preço final da obra. Tecnicamente, a introdução de adições minerais implica em desenvolvimento de pesquisa avançada, principalmente referente à microestrutura e reologia desses materiais compostos, na busca de melhor performance geotécnica da argamassa e do concreto e com redução do custo final, aproveitando na indústria esses resíduos impactantes ao meio ambiente.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), estas reduções nos custos ainda podem ser maiores, sem comprometer as características de desempenho essenciais de uma mistura de concreto, *“se materiais adequados e mais baratos forem encontrados para substituir uma porcentagem do cimento Portland”*.

Para o setor de exploração da ardósia, envolvendo a maior província de produção e beneficiamento de ardósia do país, a agregação de valor a este bem mineral, aplicando os seus rejeitos na indústria, possibilitará a adequação do setor à legislação ambiental, com ganhos socioeconômicos expressivos.

Segundo Carrusca (2001),

[ ] *a definição de novos usos industriais para os resíduos de ardósia e a minimização da geração de rejeitos nas lavras, através do desenvolvimento de trabalhos sistemáticos de pesquisa geológica e exploração desse bem mineral, favorecerá a viabilização dos produtores junto aos órgãos de controle ambiental, visando a diminuição dos impactos ambientais na região produtora e em todo o segmento de serrarias espalhado pelos centros urbanos usuários de revestimento de ardósia.*

Assim, será possível proporcionar para um setor importante para a economia de uma região, com vários municípios envolvidos e gerando milhares de empregos diretos e indiretos, uma alternativa de diminuição de resíduos impactantes ao meio ambiente. Alternativa que, economicamente, apresenta-se viável ao agregar valor ao rejeito da extração e beneficiamento, gerando novos empregos e mais desenvolvimento regional e, com referência aos aspectos ambientais, inserir as empresas produtoras na legislação de meio ambiente vigente no Estado.

Em um país onde a matéria-prima mineral, principalmente os minerais industriais, agrega pouca tecnologia, observa-se uma lacuna na oferta de insumos minerais qualificados que atendam às necessidades da indústria, ocasionando muitas vezes uma aplicação de forma inadequada em consequência da falta de conhecimento tecnológico e científico.

Inserido neste conceito, este trabalho sistemático de pesquisa tecnológica implementado em nível de doutorado, buscou abrir novas perspectivas técnico-científicas e econômicas importantes para qualificar um setor que encontra-se em desarmonia com os fundamentos que regem o meio ambiente, desenvolvendo estudos que visam conceituar um novo produto. Produto este que, geotecnicamente, deverá se pautar em rígidos preceitos e normas de qualificação e desempenho para usos diversos na construção civil.

O seu desenvolvimento envolveu a Universidade Federal de Ouro Preto, através do Núcleo de Geotecnia-NUGEO do Departamento de Engenharia Geotécnica da Escola de Minas de Ouro Preto; a Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, através do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – DEMC/EE e do CENTRO DE PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL – Grupo de Pesquisa Geoambiental em Pedro Leopoldo-MG, e do Centro de Microscopia Eletrônica da UFMG na realização de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV; do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG através do Departamento de Engenharia de Materiais-DEMAT e do Departamento de Engenharia de Transporte-DET; e da empresa Phosther Tecnologia de Aglomerações Ltda., onde foram realizados ensaios de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, Difractometria de Raios-X, Determinação de Área Superficial por método BET e Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV, em apoio a esta proposta de desenvolvimento científico e tecnológico.

Finalizando, reafirma-se o sentimento expressado em 2001, desejando que os resultados levantados neste trabalho de pesquisa tecnológica e científica, em nível de doutorado, possam contribuir qualitativamente com o desenvolvimento das múltiplas aplicações dos resíduos de ardósia nos diferentes processos produtivos industriais, neste caso, no segmento cimentício, harmonizando esse setor extrativo técnica e economicamente com

a preservação do meio ambiente e a evolução qualitativa e econômica de novos produtos industriais, em consonância com os fundamentos da Geotecnia Aplicada.

### **5.3 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS**

Considerando o fato de que se esperava atingir os maiores índices de resistência na compressão das amostras MB 24 e MB 25, elaboradas com a menor granulometria dos seus constituintes, sugere-se desenvolver uma segunda fase desta pesquisa, aplicando a mesma metodologia usada, mas acrescentado aditivos ou agentes tensoativos ou defloculantes para aumentar a molhabilidade, fazendo com que mais água esteja disponível para reações internas.

Nas fotomicrografias obtidas pela microscopia eletrônica de varredura, foram registradas uma elevada incidência de estruturas compondo poros, fissuras, bolhas de ar ou água, dentre outras, e grande intensidade de partículas ultrafinas formando aglomerados. E, neste cenário, observou-se espaços vazios não preenchidos por estes aglomerados de partículas devido ao aumento de suas dimensões, aumentando a possibilidade de menor influência das forças de ligação de van der Waals e menor resistência mecânica. Para a dispersão das suspensões, as forças de repulsão entre as partículas devem superar as forças de atração aplicando um aditivo.

O uso de aditivos eliminando os aglomerados não hidratados ou dispersando os agregados de partículas, possibilitará que as partículas muito finas preencham com mais efetividade os espaços vazios, possivelmente aumentando consideravelmente a resistência mecânica destas argamassas em estudo comparadas à argamassa padrão.

O efeito filler sobre a reologia depende da distribuição granulométrica e da forma das partículas presentes. Assim, na presença de superplastificante, quanto mais fina e mais esférica for a adição mineral incorporada, melhores serão as propriedades reológicas da mistura.

Estudos referentes ao empacotamento das partículas, concluíram que, nas adições minerais, componentes finos e ultrafinos, com formato esférico, têm sido adicionados às

misturas tanto para facilitar o auto-adensamento quanto para garantir uma melhor compactação e preenchimento dos vazios existentes entre os grãos, aumentando ainda mais a densidade desses materiais,

Outra sugestão é determinar a porosidade das amostras através de porosimetria, em processo por hidrogênio ou por mercúrio, comparando a porosidade presente na micro estrutura da amostra padrão e a porosidade presente na argamassa com adição de ardósia e escória em substituição parcial do cimento. Este parâmetro é importante para estudar, além da resistência, também a durabilidade da argamassa, com ênfase no desempenho, na performance e na vida útil ao longo da idade da argamassa.

Para a propriedade de durabilidade, propõe-se desenvolver ensaios em câmara de envelhecimento, com destaque para ciclos de umidade, temperatura e ataques químicos. Esta avaliação da durabilidade e vida útil de desempenho pode ser implementada a partir de ciclos térmicos e ataques de sulfato de sódio e sulfato de potássio, de forma que possa avaliar o comportamento dessas estruturas cimentícias reologicamente endurecidas a partir desses ciclos.

E, finalizando, sugere-se desenvolver estudos visando comprovar se o comportamento da ardósia nesta mistura ocorre apenas como ativador para facilitar a atração por forças de van der Waals na matriz cimentícia e se a escória atua como material pozolânico, melhorando a resistência mecânica da argamassa, lembrando que, sempre que um subproduto pozolânico e/ou cimentício pode ser usado em substituição parcial ao cimento Portland na argamassa ou no concreto, há uma considerável economia de energia e de custo. Neste caso em estudo, soma-se a minimização dos impactos ambientais provocados pelo descarte não conforme dos resíduos de ardósia na região produtora e beneficiadora, de acordo com a legislação ambiental em Minas Gerais.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno EB 208*. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento*: Rio de Janeiro, 1982. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215: Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão*: Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655: Concreto de cimento Portland: preparo, controle e recebimento: procedimento*. Rio de Janeiro, 2015. 23 p.

BERALDO, Antônio Ludovico; VIEIRA, Flavia de Freitas; NAGUMO, C. H.. Argamassa de Cimento Portland e Pó de Ardósia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL ICTR-2006, [s.n.], 2006, São Pedro. *Anais...*, São Pedro: Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e desenvolvimento Sustentável, 2006. p. 1-7.

BRANCO, Pércio de Moraes. *Dicionário de Mineralogia*. 2. ed. Porto alegre: Universidade, 1982.

CARRUSCA Oliveira, Evandro. *Aproveitamento industrial de resíduos de ardósia como insumo mineral na fabricação de cimento*. Orientador: Wilfrid Keller Schwabe. 2001. 158 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)-Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

CARRUSCA Oliveira, Evandro *et al.*. Aproveitamento industrial de resíduos de ardósia como insumo mineral na fabricação de cimento. In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. 2001. *Anais ...* Florianópolis. ABC - Associação Brasileira de Cerâmica, 2001. p. 180144 – 1805.

CARRUSCA Oliveira, Evandro *et al.*. Possibilidades de redução do impacto ambiental da atividade produtiva de ardósia mediante o aproveitamento industrial dos resíduos gerados na lavra e beneficiamento. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO e I CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, 2000. *Anais...* Belo Horizonte: Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM & Departamento de Engenharia de Minas-EEUFMG, 2000.

CARRUSCA Oliveira, Evandro *et al.*. Aproveitamento industrial de resíduos de ardósia. In: IX SILUBESA- SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2000. Porto Seguro. *Anais ...* Porto Seguro. ABES- Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000a ou b. p. 1191 – 1201.

CARVALHO, E. F. T. *Materiais de construção II*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2008. 156 p (Notas de aula).

CARVALHO JÚNIOR, A. N. *Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico*. Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão. 2005. 331 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Mineral). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005

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*, São Paulo, v. 55, n. 334, p. 18-32, abr./jun. 2009. ISSN 0366-6913. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S036669132009000100003&script=sci\\_abstract&tlng=p](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S036669132009000100003&script=sci_abstract&tlng=p)>.

CETEC – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Estudos integrados de recursos naturais: bacia do Alto São Francisco e parte central da área mineira da SUDENE – recursos minerais*. Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia, 1984. 255 p. (Relatório Final).

CHIES, J. A.; ROHDEN, A. B.; SILVA FILHO, L. C. P. da. Tratamentos superficiais em corpos de prova de concreto submetidos à compressão. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais Online*, São Paulo, v. 7, n. 5, p.18-32, out. 2014. ISSN 1983-4195. Disponível em <[http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas\\_ibracon/riem/volume7\\_n5.asp](http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/riem/volume7_n5.asp)>. Acesso em: 4 jul. 2016

CIMINELLI, Renato Ribeiro. Recursos Minerais Industriais. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (Eds.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: CPRM, 2003.

CIMINELLI, Renato Ribeiro. Rochas e Minerais Industriais. In: FERNANDES F. R. C.; LUZ A. B.; MATOS, G. M. M.; CASTILHOS, Z. C. (Eds.). *Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral*. Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, 2007. 380 p.

CIMPOR – Construindo Parcerias Sustentáveis. Lisboa/Portugal. Disponível em: <<http://www.cimpor-portugal.pt>>. Acesso em: 27 maio 2017

COELHO, José Mário. *A importância das matérias-primas minerais na competitividade do segmento de revestimentos cerâmicos*. Orientador: Celso Pinto Ferraz. 1996. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geociências)-Instituto de Geociências. UNICAMP, Campinas, 1996.

COSTA, Ayrton Vianna. *Concreto com rejeito de sinter feed: estudo comparativo de desempenho e caracterização microestrutural*. Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão. 2016. 253 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Mineral)-Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

COSTA, E. B. C.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Efeito do teor e da dispersão de fino calcário na aderência substrato-matriz cimentícia. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 21-34, abr./jun. 2016. ISSN 1678-8621. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000200077>>. Acesso em: 18 jun. 2016

CSN EN 998-2 ed. 3 - Specification for mortar for masonry - Part 2: Masonry mortar. 2016. Disponível em: <https://www.en-standard.eu/csn-en-998-2-ed-3-specification-for-mortar-for-masonry-part-2-masonry-mortar/>. Acesso em: 17 de maio 2017.

DANA, James D. *Manual de mineralogia*. Tradução: Rui Ribeiro Franco. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1969. 642 p.



DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p. ISBN: 978-85-7430-70. Disponível em: <<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/1447>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. *Sumário mineral brasileiro 2014*. Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves (Coord.). Brasília: DNPM, 2014. 141 p. ISSN 0101-2053. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Plano de Ação para Sustentabilidade do Setor de Rochas Ornamentais – Ardósia em Papagaios: Implementação do Plano de Ação*. Belo Horizonte: FEAM/KISTEMANN & CHIODI Assessoria e Projetos, 2014. 127p.

FERNANDES, Francisco Rego Chaves. *Os minerais industriais: conceituação, importância e inserção na economia*. Orientador: Eduardo Camilher Damasceno. 1997. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral)-Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FERREIRA, Izabel Fidelis; MORAIS; Lúvia Lara Dias de; PINTO, Joana Darc da Silva; RIBEIRO, Carmen Couto. Avaliação de resíduos de ardósia e de carbureto de cálcio como materiais pozolânicos em argamassa. In: 59ª Reunião Anual da SBPC. *Anais...*, Belém: 2007. [s.n.p.]. Disponível em: <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/59ra/livroeletronico/resumos/R3285-1.html>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

FERREIRA, Jardel Borges. *Dicionário de Geociências*. Ouro Preto: Fundação Gorceix, 1980. 550 p.

FONSECA, Gustavo Celso da. *Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica*. Orientador: Abdias Magalhães Gomes. 2010. 105 f. Dissertação (Construção Civil)-Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FRASÃO, E. B. Tecnologia para a produção e utilização de agregados. In: TANNÚS, M. B.; CARMO, J. C. C. (Org.). *Agregados para a construção civil no Brasil*. Belo Horizonte: CETEC, 2007. p. 27-73.

GOMES, Abdias Magalhães. *Adições minerais*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 103 p. (Notas de aula).

GERWINSKI, W.; GOETZ, D. Multielemental analysis of standard reference material with total reflection X-ray fluorescence (TXRF). *Fresenius Zeitschrift für Analytische Chemie*, v. 327, n. 7, p. 690-693, jan. 1987. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/BF00489163>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

GROSSI SAD, João H.; CHIODI FILHO, Cid; CHIODI, Denize Kistemann. *Panorama do setor de ardósias do estado de Minas Gerais, Brasil*. Belo Horizonte: SEME, 1998.

KELLER, Wilfrid Schwabe; HELLER, Léo. *Caracterização e pesquisa de aplicação de resíduos e aparas de ardósia*. SEBRAE-MG /DESA-UFMG/PATME / ACI-Papagaios-MG, 1996. 112 p. (Relatório).

LIMA, Júlia Piazi de. *Caracterização de agregados reciclados de rejeitos de ardósia para fabricação de tubos de concreto*. Orientador: Evandro Carrusca de Oliveira. 2015. 41 f. (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental e Sanitária.) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas. *Rochas & Minerais Industriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. 867 p. ISBN 85-7227-204-6.

MALHOTRA, V. Mohan; MEHTA, Povindar Kumar. *Pozzolanitic and cementitious materials*. Ottawa, Ontario: 1996. ISSN 1024-5308. (Advances in Concrete Technology, v. 1).

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo, J. M. *Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais*. Tradução: Cristina Borba. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p. ISBN 978-85-98576-12-1.

MASANA, Josep Vilella. La epigrafía Cristiana de Hispania durante los dos últimos decenios (1970-1990). In: *Actes du X<sup>e</sup> Congrès International d'Épigraphie grecque et latine* (Nîmes, 4-9 octobre 1992) [online]. Paris, 1997, p. 439-448. Disponível em: <<http://www.ub.es/grat/grat14.htm>>. Acesso em 20 jun. 2016.

MOREIRA, Cristiano Costa. Características e desempenho da escória de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos. In: 37<sup>a</sup> REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO e 11<sup>o</sup> ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 2006. *Anais...*, Goiânia: 2006. p. 1-13. Disponível em: <<http://www.solocap.com.br/trabalhotecnico002.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2016.

NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 472 p. ISBN 978-85-8260-072-6.

OLIVEIRA, Edgar Adrian de. *Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X*. Orientadores: Mauricio Nogueira Frota, Ricardo Queiroz Aucelio, Alessandra Licursi Maia Cerqueira da Cunha. 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia para a Qualidade e Inovação). Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011.

RODRÍGUES, Roberto Matias; BAYÓN, Gloria M. Fernández. Roca ornamental: Las pizarras ornamentales en España. *Canteras Y Explotaciones*. Madrid, n.363, p. 22 - 29, 1997.

SALES, Fernando Augusto. Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidrosodalcal, incolor e âmbar e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland. Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguilar. 2014. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SANTOS, Pérsio de Souza. *Ciência e tecnologia de argilas*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 593p. (Volume 2).

SILVA, Maria Eugênia de Castro. *Caracterização de Produtos Gerados no Processo de Expansão Térmica de Rejeitos de Ardósia*. Orientador: Antônio Eduardo Clark Peres. 2005. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SOUZA, L. P. DE F.; MANSUR, H. S. Caracterização de pó de ardósia proveniente de rejeitos quanto a cristalinidade e comportamento térmico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2000, São Pedro. *Anais...*, 2000. p. 03001-03009. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2000/Docs/TC101-048.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2016.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T. Análise de risco da formação de etringita tardia em blocos de fundação na Região Metropolitana de Recife – PE – Brasil. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais Online*, São Paulo, v. 9, n. 3, p.357-394, Jun. 2016. ISSN 1983-4195. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000300003>>. Acesso em: 13 maio 2016.

# ANEXOS

# **ANEXO I**

## **RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA DA ARDOSIA**



## **ANEXO II**

### **RESULTADO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIO-X - EDX**

**FLUORESCÊNCIA DE RAIO-X - EDX**  
**ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA EM ARGAMASSAS**  
**COMPOSTAS DE MISTURAS TERNÁRIAS DE CIMENTO PORTLAND,**  
**ARDÓSIA E ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

Group : easy 10mm sem vácuo  
Sample : MB20#075(1)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer Layer1	100.000	ug/cm2	[-----]	Total	-----
1	Elem. C02	100.000	%	[-----]	Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. Ca0	50.100	%	[ 0.142]	Quant.-FP CaKa	12.9783
2	Elem. Si02	40.327	%	[ 0.707]	Quant.-FP SiKa	0.2787
2	Elem. Fe203	4.236	%	[ 0.041]	Quant.-FP FeKa	12.5626
2	Elem. K20	2.188	%	[ 0.047]	Quant.-FP K Ka	0.4796
2	Elem. S03	1.352	%	[ 0.116]	Quant.-FP S Ka	0.0616
2	Elem. Ti02	0.683	%	[ 0.057]	Quant.-FP TiKa	0.4757
2	Elem. Mn0	0.534	%	[ 0.014]	Quant.-FP MnKa	1.2935
2	Elem. Sr0	0.300	%	[ 0.004]	Quant.-FP SrKa	4.7397
2	Elem. Ag20	0.091	%	[ 0.010]	Quant.-FP AgKa	0.8162
2	Elem. Zr02	0.080	%	[ 0.005]	Quant.-FP ZrKa	1.2990
2	Elem. Zn0	0.055	%	[ 0.007]	Quant.-FP ZnKa	0.3289
2	Elem. Bi203	0.055	%	[ 0.008]	Quant.-FP BiLa	0.3720

Group : easy 10mm sem vácuo  
Sample : MB20#075(2)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer Layer1	100.000	ug/cm2	[-----]	Total	-----
1	Elem. C02	100.000	%	[-----]	Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. Ca0	90.990	%	[ 0.225]	Quant.-FP CaKa	43.0807
2	Elem. Fe203	6.518	%	[ 0.065]	Quant.-FP FeKa	23.3266
2	Elem. Sr0	0.921	%	[ 0.010]	Quant.-FP SrKa	16.9698
2	Elem. Mn0	0.791	%	[ 0.022]	Quant.-FP MnKa	2.3208
2	Elem. Ti02	0.432	%	[ 0.082]	Quant.-FP TiKa	0.3647
2	Elem. Ag20	0.123	%	[ 0.019]	Quant.-FP AgKa	1.2727
2	Elem. Zr02	0.117	%	[ 0.009]	Quant.-FP ZrKa	2.2273
2	Elem. Zn0	0.108	%	[ 0.011]	Quant.-FP ZnKa	0.7646



Group : easy 10mm vácuo

Sample : MB20

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	6.000 um	[-----] Fix	-----	-----
1	Elem.	C10H8O4	100.000 %	[-----] Fix	-----	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	SiO2	59.897 %	[ 0.285] Quant.-FP	SiKa	10.9276
2	Elem.	CaO	16.970 %	[ 0.055] Quant.-FP	CaKa	24.2713
2	Elem.	Al2O3	16.173 %	[ 0.764] Quant.-FP	AlKa	0.4151
2	Elem.	S03	3.045 %	[ 0.028] Quant.-FP	S Ka	1.8649
2	Elem.	K2O	1.566 %	[ 0.016] Quant.-FP	K Ka	1.7900
2	Elem.	Fe2O3	1.311 %	[ 0.011] Quant.-FP	FeKa	25.8939
2	Elem.	P2O5	0.622 %	[ 0.127] Quant.-FP	P Ka	0.1362
2	Elem.	TiO2	0.229 %	[ 0.018] Quant.-FP	TiKa	1.1262
2	Elem.	SrO	0.064 %	[ 0.001] Quant.-FP	SrKa	7.1009
2	Elem.	ZrO2	0.054 %	[ 0.002] Quant.-FP	ZrKa	6.2562
2	Elem.	MnO	0.030 %	[ 0.005] Quant.-FP	MnKa	0.4895
2	Elem.	ZnO	0.016 %	[ 0.002] Quant.-FP	ZnKa	0.6649
2	Elem.	Au20	0.012 %	[ 0.003] Quant.-FP	AuLa	0.4346
2	Elem.	Rb20	0.007 %	[ 0.001] Quant.-FP	RbKa	0.8020
2	Elem.	Y2O3	0.005 %	[ 0.001] Quant.-FP	Y Ka	0.5143

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB21#075(1)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	100.000 ug/cm2	[-----] Total	-----	-----
1	Elem.	C02	100.000 %	[-----] Fix	-----	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	SiO2	56.464 %	[ 0.752] Quant.-FP	SiKa	0.8010
2	Elem.	CaO	36.333 %	[ 0.103] Quant.-FP	CaKa	19.1450
2	Elem.	Fe2O3	3.299 %	[ 0.032] Quant.-FP	FeKa	23.2891
2	Elem.	S03	1.435 %	[ 0.095] Quant.-FP	S Ka	0.1168
2	Elem.	K2O	1.224 %	[ 0.031] Quant.-FP	K Ka	0.4992
2	Elem.	TiO2	0.481 %	[ 0.041] Quant.-FP	TiKa	0.7913
2	Elem.	MnO	0.253 %	[ 0.013] Quant.-FP	MnKa	1.4567
2	Elem.	SrO	0.187 %	[ 0.003] Quant.-FP	SrKa	7.1846
2	Elem.	CuO	0.080 %	[ 0.006] Quant.-FP	CuKa	0.9598
2	Elem.	ZrO2	0.060 %	[ 0.004] Quant.-FP	ZrKa	2.3720
2	Elem.	W03	0.059 %	[ 0.010] Quant.-FP	W La	0.3974
2	Elem.	ZnO	0.052 %	[ 0.005] Quant.-FP	ZnKa	0.7431
2	Elem.	Ag20	0.047 %	[ 0.008] Quant.-FP	AgKa	1.0437
2	Elem.	NiO	0.025 %	[ 0.005] Quant.-FP	NiKa	0.2933

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB21#075(2)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer Layer1	100.000	ug/cm2	[-----]	Total	-----
1	Elem. C02	100.000	%	[-----]	Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. Ca0	51.612	%	[ 0.139]	Quant.-FP CaKa	23.7340
2	Elem. Si02	38.095	%	[ 0.679]	Quant.-FP SiKa	0.4624
2	Elem. Fe203	4.854	%	[ 0.046]	Quant.-FP FeKa	25.0187
2	Elem. K20	2.162	%	[ 0.024]	Quant.-FP K Ka	0.8456
2	Elem. S03	1.740	%	[ 0.096]	Quant.-FP S Ka	0.1421
2	Elem. Ti02	0.719	%	[ 0.058]	Quant.-FP TiKa	0.8739
2	Elem. Mn0	0.395	%	[ 0.012]	Quant.-FP MnKa	1.6635
2	Elem. Sr0	0.305	%	[ 0.004]	Quant.-FP SrKa	8.3611
2	Elem. Zr02	0.072	%	[ 0.005]	Quant.-FP ZrKa	2.0471
2	Elem. Cu0	0.046	%	[ 0.007]	Quant.-FP CuKa	0.3942

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB21#075(3)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer Layer1	100.000	ug/cm2	[-----]	Total	-----
1	Elem. C02	100.000	%	[-----]	Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. Si02	59.351	%	[ 0.749]	Quant.-FP SiKa	0.7793
2	Elem. Ca0	32.612	%	[ 0.099]	Quant.-FP CaKa	14.6305
2	Elem. K20	4.449	%	[ 0.037]	Quant.-FP K Ka	1.6252
2	Elem. Fe203	2.566	%	[ 0.029]	Quant.-FP FeKa	16.7174
2	Elem. Ti02	0.380	%	[ 0.039]	Quant.-FP TiKa	0.5714
2	Elem. Mn0	0.202	%	[ 0.012]	Quant.-FP MnKa	1.0675
2	Elem. Sr0	0.188	%	[ 0.004]	Quant.-FP SrKa	6.8624
2	Elem. Ag20	0.107	%	[ 0.008]	Quant.-FP AgKa	2.2284
2	Elem. Zr02	0.053	%	[ 0.004]	Quant.-FP ZrKa	2.0023
2	Elem. As203	0.035	%	[ 0.024]	Quant.-FP AsKb	0.1404
2	Elem. Rb20	0.035	%	[ 0.003]	Quant.-FP RbKa	1.2393
2	Elem. Br	0.022	%	[ 0.003]	Quant.-FP BrKa	0.7107

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB21#075(4)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	100.000	ug/cm2	[-----] Total	-----
1	Elem.	C02	100.000	%	[-----] Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	Ca0	48.346	%	[ 0.136] Quant.-FP	CaKa 15.7980
2	Elem.	Si02	42.027	%	[ 0.719] Quant.-FP	SiKa 0.3660
2	Elem.	Fe203	4.733	%	[ 0.044] Quant.-FP	FeKa 18.0671
2	Elem.	K20	2.240	%	[ 0.045] Quant.-FP	K Ka 0.6139
2	Elem.	S03	1.113	%	[ 0.102] Quant.-FP	S Ka 0.0629
2	Elem.	Ti02	0.490	%	[ 0.055] Quant.-FP	TiKa 0.4400
2	Elem.	Mn0	0.401	%	[ 0.020] Quant.-FP	MnKa 1.2521
2	Elem.	Sr0	0.325	%	[ 0.004] Quant.-FP	SrKa 6.5777
2	Elem.	Zr02	0.102	%	[ 0.005] Quant.-FP	ZrKa 2.1287
2	Elem.	Ni0	0.073	%	[ 0.008] Quant.-FP	NiKa 0.4542
2	Elem.	Ag20	0.068	%	[ 0.012] Quant.-FP	AgKa 0.7755
2	Elem.	Zn0	0.041	%	[ 0.007] Quant.-FP	ZnKa 0.3136
2	Elem.	Rb20	0.041	%	[ 0.004] Quant.-FP	RbKa 0.7989

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB24#44(1)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	100.000	ug/cm2	[-----] Total	-----
1	Elem.	C02	100.000	%	[-----] Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	Si02	53.113	%	[ 0.710] Quant.-FP	SiKa 0.4516
2	Elem.	Ca0	36.538	%	[ 0.116] Quant.-FP	CaKa 11.2308
2	Elem.	Fe203	5.169	%	[ 0.046] Quant.-FP	FeKa 21.3813
2	Elem.	K20	3.294	%	[ 0.065] Quant.-FP	K Ka 0.8217
2	Elem.	S03	0.615	%	[ 0.141] Quant.-FP	S Ka 0.0310
2	Elem.	Ti02	0.582	%	[ 0.069] Quant.-FP	TiKa 0.5682
2	Elem.	Sr0	0.218	%	[ 0.007] Quant.-FP	SrKa 4.7743
2	Elem.	Ag20	0.169	%	[ 0.014] Quant.-FP	AgKa 2.0920
2	Elem.	Zr02	0.110	%	[ 0.006] Quant.-FP	ZrKa 2.4824
2	Elem.	Mn0	0.109	%	[ 0.018] Quant.-FP	MnKa 0.3701
2	Elem.	Zn0	0.045	%	[ 0.008] Quant.-FP	ZnKa 0.3655
2	Elem.	Rb20	0.039	%	[ 0.005] Quant.-FP	RbKa 0.8249

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB24#44(2)

Layer Info	Analyte	Result		[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1						
1	Layer	Layer1	100.000	ug/cm2	[-----]	Total	-----
1	Elem.	C02	100.000	%	[-----]	Fix	-----
-----							
B	Base						
2	Elem.	Ca0	55.259	%	[ 0.153]	Quant.-FP	CaKa 14.2350
2	Elem.	Si02	31.515	%	[ 0.625]	Quant.-FP	SiKa 0.2152
2	Elem.	Fe203	6.575	%	[ 0.052]	Quant.-FP	FeKa 18.4084
2	Elem.	K20	3.158	%	[ 0.031]	Quant.-FP	K Ka 0.7204
2	Elem.	S03	1.674	%	[ 0.113]	Quant.-FP	S Ka 0.0815
2	Elem.	Ti02	0.815	%	[ 0.055]	Quant.-FP	TiKa 0.5432
2	Elem.	Sr0	0.416	%	[ 0.005]	Quant.-FP	SrKa 6.0321
2	Elem.	Zr02	0.232	%	[ 0.006]	Quant.-FP	ZrKa 3.4559
2	Elem.	Mn0	0.147	%	[ 0.014]	Quant.-FP	MnKa 0.3374
2	Elem.	Ag20	0.102	%	[ 0.011]	Quant.-FP	AgKa 0.8282
2	Elem.	Rb20	0.039	%	[ 0.004]	Quant.-FP	RbKa 0.5573
2	Elem.	Cu0	0.036	%	[ 0.008]	Quant.-FP	CuKa 0.1648
2	Elem.	V205	0.031	%	[ 0.031]	Quant.-FP	V Ka 0.0282

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB24#44(3)

Layer Info	Analyte	Result		[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1						
1	Layer	Layer1	100.000	ug/cm2	[-----]	Total	-----
1	Elem.	C02	100.000	%	[-----]	Fix	-----
-----							
B	Base						
2	Elem.	Ca0	49.376	%	[ 0.135]	Quant.-FP	CaKa 25.3416
2	Elem.	Si02	42.153	%	[ 0.705]	Quant.-FP	SiKa 0.5802
2	Elem.	Fe203	3.977	%	[ 0.038]	Quant.-FP	FeKa 23.6612
2	Elem.	K20	2.141	%	[ 0.041]	Quant.-FP	K Ka 0.9226
2	Elem.	S03	0.893	%	[ 0.088]	Quant.-FP	S Ka 0.0793
2	Elem.	Ti02	0.657	%	[ 0.051]	Quant.-FP	TiKa 0.9141
2	Elem.	Sr0	0.432	%	[ 0.005]	Quant.-FP	SrKa 13.8561
2	Elem.	Zr02	0.153	%	[ 0.005]	Quant.-FP	ZrKa 5.0729
2	Elem.	Cu0	0.086	%	[ 0.009]	Quant.-FP	CuKa 0.8660
2	Elem.	Mn0	0.077	%	[ 0.012]	Quant.-FP	MnKa 0.3734
2	Elem.	Zn0	0.032	%	[ 0.006]	Quant.-FP	ZnKa 0.3908
2	Elem.	Rb20	0.022	%	[ 0.003]	Quant.-FP	RbKa 0.6861

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB24#44(4)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer Layer1	100.000	ug/cm2	[-----] Total	-----	-----
1	Elem. C02	100.000	%	[-----] Fix	-----	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. Ca0	52.350	%	[ 0.147] Quant.-FP	CaKa	14.8586
2	Elem. Si02	34.376	%	[ 0.668] Quant.-FP	SiKa	0.2532
2	Elem. Fe203	6.704	%	[ 0.052] Quant.-FP	FeKa	20.9603
2	Elem. S03	2.519	%	[ 0.118] Quant.-FP	S Ka	0.1290
2	Elem. K20	2.208	%	[ 0.047] Quant.-FP	K Ka	0.5353
2	Elem. Ti02	0.995	%	[ 0.063] Quant.-FP	TiKa	0.7432
2	Elem. Sr0	0.350	%	[ 0.004] Quant.-FP	SrKa	5.6451
2	Elem. Zr02	0.244	%	[ 0.007] Quant.-FP	ZrKa	4.0453
2	Elem. Mn0	0.144	%	[ 0.015] Quant.-FP	MnKa	0.3680
2	Elem. V205	0.045	%	[ 0.033] Quant.-FP	V Ka	0.0454
2	Elem. Zn0	0.033	%	[ 0.007] Quant.-FP	ZnKa	0.2023
2	Elem. Rb20	0.032	%	[ 0.004] Quant.-FP	RbKa	0.5018

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB24#44(5)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer Layer1	100.000	ug/cm2	[-----] Total	-----	-----
1	Elem. C02	100.000	%	[-----] Fix	-----	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. Ca0	45.567	%	[ 0.131] Quant.-FP	CaKa	17.9413
2	Elem. Si02	41.031	%	[ 0.695] Quant.-FP	SiKa	0.4412
2	Elem. Fe203	5.789	%	[ 0.049] Quant.-FP	FeKa	27.4920
2	Elem. K20	3.804	%	[ 0.035] Quant.-FP	K Ka	1.2767
2	Elem. S03	1.623	%	[ 0.096] Quant.-FP	S Ka	0.1139
2	Elem. Ti02	1.235	%	[ 0.064] Quant.-FP	TiKa	1.3990
2	Elem. Sr0	0.391	%	[ 0.005] Quant.-FP	SrKa	9.6841
2	Elem. Zr02	0.281	%	[ 0.007] Quant.-FP	ZrKa	7.1622
2	Elem. Mn0	0.158	%	[ 0.014] Quant.-FP	MnKa	0.6155
2	Elem. V205	0.043	%	[ 0.032] Quant.-FP	V Ka	0.0656
2	Elem. Zn0	0.041	%	[ 0.007] Quant.-FP	ZnKa	0.3850
2	Elem. Rb20	0.037	%	[ 0.004] Quant.-FP	RbKa	0.8983

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB25#044(1)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	0.000	ug/cm2	[-----] Total	-----
1	Elem.	C02	0.000	%	[-----] Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	Si02	43.797	%	[ 0.692] Quant.-FP	SiKa 0.5786
2	Elem.	Ca0	43.793	%	[ 0.122] Quant.-FP	CaKa 20.8393
2	Elem.	Fe203	4.894	%	[ 0.043] Quant.-FP	FeKa 28.9459
2	Elem.	K20	3.972	%	[ 0.035] Quant.-FP	K Ka 1.6022
2	Elem.	S03	1.893	%	[ 0.099] Quant.-FP	S Ka 0.1594
2	Elem.	Ti02	0.931	%	[ 0.057] Quant.-FP	TiKa 1.3003
2	Elem.	Sr0	0.257	%	[ 0.004] Quant.-FP	SrKa 8.0831
2	Elem.	Zr02	0.225	%	[ 0.006] Quant.-FP	ZrKa 7.2941
2	Elem.	Mn0	0.127	%	[ 0.013] Quant.-FP	MnKa 0.6117
2	Elem.	Cu0	0.041	%	[ 0.007] Quant.-FP	CuKa 0.4011
2	Elem.	Zn0	0.038	%	[ 0.006] Quant.-FP	ZnKa 0.4485
2	Elem.	Rb20	0.032	%	[ 0.004] Quant.-FP	RbKa 0.9814

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : MB25#044(2)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	100.000	ug/cm2	[-----] Total	-----
1	Elem.	C02	100.000	%	[-----] Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	Si02	51.554	%	[ 0.764] Quant.-FP	SiKa 0.5583
2	Elem.	Ca0	36.816	%	[ 0.112] Quant.-FP	CaKa 14.6180
2	Elem.	Fe203	4.913	%	[ 0.041] Quant.-FP	FeKa 26.0118
2	Elem.	K20	3.082	%	[ 0.030] Quant.-FP	K Ka 0.9858
2	Elem.	S03	1.335	%	[ 0.101] Quant.-FP	S Ka 0.0866
2	Elem.	Ti02	1.029	%	[ 0.054] Quant.-FP	TiKa 1.2915
2	Elem.	Cu0	0.428	%	[ 0.008] Quant.-FP	CuKa 3.7194
2	Elem.	Sr0	0.323	%	[ 0.004] Quant.-FP	SrKa 8.8701
2	Elem.	Zr02	0.186	%	[ 0.005] Quant.-FP	ZrKa 5.2515
2	Elem.	Mn0	0.139	%	[ 0.013] Quant.-FP	MnKa 0.6001
2	Elem.	Zn0	0.095	%	[ 0.007] Quant.-FP	ZnKa 0.9873
2	Elem.	V205	0.043	%	[ 0.027] Quant.-FP	V Ka 0.0734
2	Elem.	At	0.030	%	[ 0.005] Quant.-FP	AtLa 0.4387
2	Elem.	Rb20	0.029	%	[ 0.003] Quant.-FP	RbKa 0.7764

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : PADRAO#044(1)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer Layer1	100.000	ug/cm2	[-----]	Total	-----
1	Elem. C02	100.000	%	[-----]	Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. Si02	52.347	%	[ 0.716]	Quant.-FP SiKa	0.8329
2	Elem. Ca0	39.182	%	[ 0.111]	Quant.-FP CaKa	21.2692
2	Elem. K20	4.635	%	[ 0.037]	Quant.-FP K Ka	2.1113
2	Elem. Fe203	2.049	%	[ 0.024]	Quant.-FP FeKa	15.0646
2	Elem. S03	0.895	%	[ 0.083]	Quant.-FP S Ka	0.0837
2	Elem. Sr0	0.302	%	[ 0.004]	Quant.-FP SrKa	12.5002
2	Elem. Ti02	0.268	%	[ 0.034]	Quant.-FP TiKa	0.4520
2	Elem. Zr02	0.091	%	[ 0.004]	Quant.-FP ZrKa	3.8684
2	Elem. Zn0	0.062	%	[ 0.005]	Quant.-FP ZnKa	0.9673
2	Elem. Ge02	0.060	%	[ 0.005]	Quant.-FP GeKa	1.0970
2	Elem. Mn0	0.046	%	[ 0.009]	Quant.-FP MnKa	0.2728
2	Elem. Ni0	0.032	%	[ 0.005]	Quant.-FP NiKa	0.4134
2	Elem. Rb20	0.031	%	[ 0.003]	Quant.-FP RbKa	1.2411

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : PADRAO#044(2)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer Layer1	100.000	ug/cm2	[-----]	Total	-----
1	Elem. C02	100.000	%	[-----]	Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. Si02	52.035	%	[ 0.720]	Quant.-FP SiKa	0.6782
2	Elem. Ca0	40.553	%	[ 0.113]	Quant.-FP CaKa	18.4118
2	Elem. K20	3.885	%	[ 0.033]	Quant.-FP K Ka	1.4691
2	Elem. Fe203	2.278	%	[ 0.025]	Quant.-FP FeKa	13.6170
2	Elem. Ti02	0.390	%	[ 0.036]	Quant.-FP TiKa	0.5377
2	Elem. Sr0	0.298	%	[ 0.003]	Quant.-FP SrKa	10.0084
2	Elem. S03	0.256	%	[ 0.073]	Quant.-FP S Ka	0.0197
2	Elem. Zr02	0.073	%	[ 0.004]	Quant.-FP ZrKa	2.5206
2	Elem. Cu0	0.059	%	[ 0.005]	Quant.-FP CuKa	0.6172
2	Elem. Mn0	0.056	%	[ 0.012]	Quant.-FP MnKa	0.2714
2	Elem. V205	0.050	%	[ 0.021]	Quant.-FP V Ka	0.0932
2	Elem. Zn0	0.043	%	[ 0.005]	Quant.-FP ZnKa	0.5359
2	Elem. Rb20	0.024	%	[ 0.003]	Quant.-FP RbKa	0.7744

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : PADRAO#075(1)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	100.000	ug/cm2	[-----] Total	-----
1	Elem.	C02	100.000	%	[-----] Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	Ca0	54.617	%	[ 0.142] Quant.-FP	CaKa 22.6845
2	Elem.	Si02	37.111	%	[ 0.616] Quant.-FP	SiKa 0.4262
2	Elem.	K20	3.130	%	[ 0.030] Quant.-FP	K Ka 1.1424
2	Elem.	Fe203	2.895	%	[ 0.036] Quant.-FP	FeKa 13.4993
2	Elem.	S03	1.282	%	[ 0.104] Quant.-FP	S Ka 0.0989
2	Elem.	Sr0	0.411	%	[ 0.005] Quant.-FP	SrKa 10.5871
2	Elem.	Ti02	0.276	%	[ 0.050] Quant.-FP	TiKa 0.2972
2	Elem.	Zr02	0.162	%	[ 0.006] Quant.-FP	ZrKa 4.2988
2	Elem.	Mn0	0.062	%	[ 0.013] Quant.-FP	MnKa 0.2364
2	Elem.	Pd0	0.027	%	[ 0.012] Quant.-FP	PdKa 0.3914
2	Elem.	Cu0	0.027	%	[ 0.007] Quant.-FP	CuKa 0.2201

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : PADRAO#075(2)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	100.000	ug/cm2	[-----] Total	-----
1	Elem.	C02	100.000	%	[-----] Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	Ca0	88.182	%	[ 0.209] Quant.-FP	CaKa 56.6306
2	Elem.	Si02	6.145	%	[ 0.713] Quant.-FP	SiKa 0.0968
2	Elem.	Fe203	3.523	%	[ 0.041] Quant.-FP	FeKa 17.9351
2	Elem.	K20	0.670	%	[ 0.036] Quant.-FP	K Ka 0.4414
2	Elem.	Sr0	0.419	%	[ 0.005] Quant.-FP	SrKa 11.5747
2	Elem.	Zn0	0.262	%	[ 0.006] Quant.-FP	ZnKa 2.7508
2	Elem.	Ti02	0.243	%	[ 0.061] Quant.-FP	TiKa 0.2868
2	Elem.	S03	0.218	%	[ 0.082] Quant.-FP	S Ka 0.0320
2	Elem.	Ag20	0.095	%	[ 0.013] Quant.-FP	AgKa 1.4980
2	Elem.	Mn0	0.086	%	[ 0.015] Quant.-FP	MnKa 0.3588
2	Elem.	Zr02	0.083	%	[ 0.006] Quant.-FP	ZrKa 2.3625
2	Elem.	Nb0	0.043	%	[ 0.004] Quant.-FP	NbKa 1.4833
2	Elem.	Pd0	0.031	%	[ 0.014] Quant.-FP	PdKa 0.4710



Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : PADRAO#075(3)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	100.000	ug/cm2	[-----] Total	-----
1	Elem.	C02	100.000	%	[-----] Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	Ca0	53.436	%	[ 0.137] Quant.-FP	CaKa 25.0422
2	Elem.	Si02	39.154	%	[ 0.654] Quant.-FP	SiKa 0.5040
2	Elem.	Fe203	2.648	%	[ 0.031] Quant.-FP	FeKa 14.0229
2	Elem.	K20	2.593	%	[ 0.026] Quant.-FP	K Ka 1.0529
2	Elem.	S03	1.109	%	[ 0.086] Quant.-FP	S Ka 0.0944
2	Elem.	Ti02	0.376	%	[ 0.046] Quant.-FP	TiKa 0.4596
2	Elem.	Sr0	0.368	%	[ 0.004] Quant.-FP	SrKa 10.7893
2	Elem.	Ag20	0.101	%	[ 0.010] Quant.-FP	AgKa 1.6765
2	Elem.	Mn0	0.067	%	[ 0.011] Quant.-FP	MnKa 0.2868
2	Elem.	Zr02	0.049	%	[ 0.004] Quant.-FP	ZrKa 1.4793
2	Elem.	Hg0	0.046	%	[ 0.007] Quant.-FP	HgLa 0.4705
2	Elem.	Zn0	0.028	%	[ 0.005] Quant.-FP	ZnKa 0.3135
2	Elem.	Br	0.025	%	[ 0.003] Quant.-FP	BrKa 0.6540

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : PADRAO#075(4)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	100.000	ug/cm2	[-----] Total	-----
1	Elem.	C02	100.000	%	[-----] Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	Ca0	83.774	%	[ 0.197] Quant.-FP	CaKa 54.6579
2	Elem.	Si02	10.341	%	[ 0.722] Quant.-FP	SiKa 0.1670
2	Elem.	Fe203	3.517	%	[ 0.040] Quant.-FP	FeKa 18.8706
2	Elem.	K20	0.873	%	[ 0.036] Quant.-FP	K Ka 0.5705
2	Elem.	Ti02	0.458	%	[ 0.067] Quant.-FP	TiKa 0.5708
2	Elem.	Sr0	0.376	%	[ 0.005] Quant.-FP	SrKa 10.9433
2	Elem.	Zn0	0.268	%	[ 0.007] Quant.-FP	ZnKa 2.9664
2	Elem.	S03	0.131	%	[ 0.076] Quant.-FP	S Ka 0.0189
2	Elem.	Ag20	0.112	%	[ 0.014] Quant.-FP	AgKa 1.8710
2	Elem.	Mn0	0.105	%	[ 0.016] Quant.-FP	MnKa 0.4604
2	Elem.	Zr02	0.044	%	[ 0.006] Quant.-FP	ZrKa 1.3059

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : PADRAO#075(5)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer Layer1	100.000	ug/cm2	[-----]	Total	-----
1	Elem. C02	100.000	%	[-----]	Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. Ca0	49.211	%	[ 0.130]	Quant.-FP CaKa	24.6469
2	Elem. Si02	43.878	%	[ 0.689]	Quant.-FP SiKa	0.6141
2	Elem. K20	2.893	%	[ 0.028]	Quant.-FP K Ka	1.2358
2	Elem. Fe203	2.101	%	[ 0.027]	Quant.-FP FeKa	12.5256
2	Elem. S03	1.113	%	[ 0.093]	Quant.-FP S Ka	0.0988
2	Elem. Sr0	0.295	%	[ 0.004]	Quant.-FP SrKa	9.8928
2	Elem. Ti02	0.212	%	[ 0.041]	Quant.-FP TiKa	0.2909
2	Elem. Ag20	0.086	%	[ 0.009]	Quant.-FP AgKa	1.6375
2	Elem. Mn0	0.065	%	[ 0.011]	Quant.-FP MnKa	0.3135
2	Elem. Zr02	0.040	%	[ 0.004]	Quant.-FP ZrKa	1.3734
2	Elem. Cu0	0.035	%	[ 0.005]	Quant.-FP CuKa	0.3641
2	Elem. Ge02	0.033	%	[ 0.005]	Quant.-FP GeKa	0.4937
2	Elem. Zn0	0.019	%	[ 0.004]	Quant.-FP ZnKa	0.2445
2	Elem. Rb20	0.018	%	[ 0.003]	Quant.-FP RbKa	0.5856

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : PADRAO#075(6)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer Layer1	100.000	ug/cm2	[-----]	Total	-----
1	Elem. C02	100.000	%	[-----]	Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. Si02	51.681	%	[ 0.728]	Quant.-FP SiKa	0.6739
2	Elem. Ca0	41.626	%	[ 0.114]	Quant.-FP CaKa	19.8186
2	Elem. S03	2.127	%	[ 0.113]	Quant.-FP S Ka	0.1645
2	Elem. Fe203	1.924	%	[ 0.023]	Quant.-FP FeKa	11.6805
2	Elem. K20	1.673	%	[ 0.035]	Quant.-FP K Ka	0.6365
2	Elem. Sr0	0.278	%	[ 0.003]	Quant.-FP SrKa	9.4990
2	Elem. Sm203	0.248	%	[ 0.033]	Quant.-FP SmLa	0.3946
2	Elem. Ti02	0.185	%	[ 0.036]	Quant.-FP TiKa	0.2586
2	Elem. Mn0	0.065	%	[ 0.011]	Quant.-FP MnKa	0.3241
2	Elem. Ge02	0.059	%	[ 0.005]	Quant.-FP GeKa	0.8873
2	Elem. Zn0	0.055	%	[ 0.005]	Quant.-FP ZnKa	0.7063
2	Elem. Zr02	0.045	%	[ 0.003]	Quant.-FP ZrKa	1.5730
2	Elem. Cu0	0.021	%	[ 0.005]	Quant.-FP CuKa	0.2270
2	Elem. Rb20	0.014	%	[ 0.002]	Quant.-FP RbKa	0.4661

Group : easy 10mm sem vácuo

Sample : PADRAO#075(7)

Layer Info	Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1	Layer1					
1	Layer	Layer1	100.000	ug/cm2	[-----] Total	-----
1	Elem.	C02	100.000	%	[-----] Fix	-----
-----						
B	Base					
2	Elem.	Ca0	57.049	%	[ 0.149] Quant.-FP	CaKa 20.2420
2	Elem.	Si02	34.450	%	[ 0.637] Quant.-FP	SiKa 0.3278
2	Elem.	Fe203	3.528	%	[ 0.036] Quant.-FP	FeKa 13.5100
2	Elem.	K20	2.165	%	[ 0.043] Quant.-FP	K Ka 0.6716
2	Elem.	S03	1.876	%	[ 0.123] Quant.-FP	S Ka 0.1235
2	Elem.	Sr0	0.360	%	[ 0.004] Quant.-FP	SrKa 7.5335
2	Elem.	Ti02	0.272	%	[ 0.047] Quant.-FP	TiKa 0.2422
2	Elem.	Pd0	0.103	%	[ 0.010] Quant.-FP	PdKa 1.2016
2	Elem.	Mn0	0.082	%	[ 0.012] Quant.-FP	MnKa 0.2565
2	Elem.	Zr02	0.049	%	[ 0.004] Quant.-FP	ZrKa 1.0661
2	Elem.	Zn0	0.036	%	[ 0.006] Quant.-FP	ZnKa 0.2842
2	Elem.	Cu0	0.030	%	[ 0.006] Quant.-FP	CuKa 0.1938

Execução

Responsáveis Técnicas Laboratório:

Cristina Aparecida Esteves

Mariana Vieira

Acompanhamento;

Evandro Carrusca de Oliveira

## **ANEXO III**

### **RESULTADO DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREA SUPERFICIAL POR MÉTODO BET**

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction  
for NOVA instruments  
©1994-2013, Quantachrome Instruments  
version 11.03

Analysis Report  
 Operator: quantachrome Date: 2016/10/11 Operator: quantachrome  
 Date: 2016/10/19  
 Sample ID: PADRAO-14D Filename: sttn\_A\_20161011\_1.qps  
 Sample Desc: Comment:  
 Sample weight: 0.3696 g Sample Volume: 1 cc  
 Outgas Time: 5.0 hrs Outgas Temp: 300.0 C  
 Analysis gas: Nitrogen Bath Temp: 273.0 K  
 Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des) Equil time: 60/60 sec (ads/des) Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)  
 Analysis Time: 276.5 min End of run: 2016/10/11 18:02:29 Instrument: Nova Station A  
 Cell ID: 0

Data Reduction Parameters

Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K

Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure P/Po	Volume @ STP cc/g	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
5.30760e-02	1.2241	3.6638e+01
9.95830e-02	1.3601	6.5062e+01
1.53470e-01	1.4873	9.7531e+01
2.14559e-01	1.6075	1.3597e+02
2.56341e-01	1.6940	1.6281e+02
2.98061e-01	1.7737	1.9155e+02
3.48101e-01	1.8661	2.2895e+02
3.99174e-01	1.9715	2.6963e+02
4.51324e-01	2.1131	3.1146e+02
5.00875e-01	2.2378	3.5879e+02
5.52337e-01	2.3581	4.1864e+02

BET summary

Slope = 744.218  
 Intercept = -1.808e+01  
 Correlation coefficient, r = 0.994901  
 C constant = -40.158

Surface Area = 4.796 m<sup>2</sup>/g

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction  
for NOVA instruments  
©1994-2013, Quantachrome Instruments  
version 11.03

Analysis Report  
 Operator: quantachrome Date: 2016/10/11 Operator: quantachrome  
 Date: 2016/10/19  
 Sample ID: **PADRAO-28D** Filename: sttn\_B\_20161011\_1.qps  
 Sample Desc: Comment:  
 Sample weight: 0.3234 g Sample Volume: 1 cc  
 Outgas Time: 5.0 hrs Outgas Temp: 300.0 C  
 Analysis gas: Nitrogen Bath Temp: 273.0 K  
 Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des) Equil time: 60/60 sec (ads/des) Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)  
 Analysis Time: 278.4 min End of run: 2016/10/11 18:04:22 Instrument: Nova Station B  
 Cell ID: 0

Data Reduction Parameters

Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K  
 Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure P/Po	Volume @ STP cc/g	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
5.49880e-02	1.0604	4.3906e+01
1.00333e-01	1.1822	7.5477e+01
1.54395e-01	1.2956	1.1276e+02
2.01292e-01	1.3838	1.4572e+02
2.54834e-01	1.4841	1.8437e+02
2.98818e-01	1.5662	2.1772e+02
3.49011e-01	1.6485	2.6020e+02
3.98394e-01	1.7599	3.0107e+02
4.52402e-01	1.9000	3.4791e+02
4.99804e-01	2.0010	3.9955e+02
5.49990e-01	2.1139	4.6259e+02

BET summary

Slope = 821.718  
 Intercept = -1.565e+01  
 Correlation coefficient, r = 0.995789  
 C constant = -51.514  
 Surface Area = 4.320 m<sup>2</sup>/g

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction  
for NOVA instruments  
©1994-2013, Quantachrome Instruments  
version 11.03

Analysis Report  
 Operator: quantachrome Date: 2016/10/14 Operator: quantachrome  
 Date: 2016/10/19  
 Sample ID: MB20 Filename: sttn\_A\_20161013\_1.qps  
 Sample Desc: Comment:  
 Sample weight: 0.3446 g Sample Volume: 1 cc  
 Outgas Time: 3.0 hrs Outgas Temp: 300.0 C  
 Analysis gas: Nitrogen Bath Temp: 273.0 K  
 Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des) Equil time: 60/60 sec (ads/des) Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)  
 Analysis Time: 315.6 min End of run: 2016/10/14 21:22:40 Instrument: Nova Station A  
 Cell ID: 0

Data Reduction Parameters

Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K

Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure P/Po	Volume @ STP cc/g	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
6.55010e-02	2.6529	2.1140e+01
1.05885e-01	2.8894	3.2793e+01
1.51871e-01	3.0931	4.6321e+01
2.11028e-01	3.3309	6.4250e+01
2.54794e-01	3.4990	7.8185e+01
2.98370e-01	3.6721	9.2657e+01
3.48802e-01	3.8735	1.1064e+02
3.94734e-01	4.0667	1.2831e+02
4.42993e-01	4.2746	1.4886e+02
4.97007e-01	4.5307	1.7449e+02
5.47317e-01	4.8080	2.0120e+02

BET summary

Slope = 365.023  
 Intercept = -1.022e+01  
 Correlation coefficient, r = 0.994689  
 C constant = -34.724

Surface Area = 9.815 m<sup>2</sup>/g

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction  
for NOVA instruments  
©1994-2013, Quantachrome Instruments  
version 11.03

Analysis Report  
 Operator: quantachrome Date: 2016/10/14 Operator: quantachrome  
 Date: 2016/10/19  
 Sample ID: MB21 Filename: sttn\_B\_20161013\_1.qps  
 Sample Desc: Comment:  
 Sample weight: 0.3499 g Sample Volume: 1 cc  
 Outgas Time: 3.0 hrs Outgas Temp: 300.0 C  
 Analysis gas: Nitrogen Bath Temp: 273.0 K  
 Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des) Equil time: 60/60 sec (ads/des) Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)  
 Analysis Time: 317.5 min End of run: 2016/10/14 21:24:34 Instrument: Nova Station B  
 Cell ID: 0

Data Reduction Parameters

Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K  
 Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure P/Po	Volume @ STP cc/g	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
5.00960e-02	1.6548	2.5500e+01
9.76270e-02	1.8581	4.6587e+01
1.52797e-01	2.0374	7.0827e+01
1.99579e-01	2.1789	9.1561e+01
2.52131e-01	2.3320	1.1567e+02
2.98285e-01	2.4787	1.3721e+02
3.46736e-01	2.6368	1.6106e+02
3.96494e-01	2.8069	1.8727e+02
4.48312e-01	2.9896	2.1748e+02
4.95798e-01	3.1867	2.4689e+02
5.47585e-01	3.4224	2.8296e+02

BET summary

Slope = 506.923  
 Intercept = -7.494e+00  
 Correlation coefficient, r = 0.997000  
 C constant = -66.644

Surface Area = 6.973 m<sup>2</sup>/g



Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction  
for NOVA instruments  
©1994-2013, Quantachrome Instruments  
version 11.03

Analysis Report  
 Operator: quantachrome Date: 2016/10/14 Operator: quantachrome  
 Date: 2016/10/19  
 Sample ID: MB24 Filename: sttn\_A\_20161014\_1.qps  
 Sample Desc: Comment:  
 Sample weight: 0.2825 g Sample Volume: 1 cc  
 Outgas Time: 4.0 hrs Outgas Temp: 300.0 C  
 Analysis gas: Nitrogen Bath Temp: 273.0 K  
 Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des) Equil time: 60/60 sec (ads/des) Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)  
 Analysis Time: 286.2 min End of run: 2016/10/14 19:52:57 Instrument: Nova Station A  
 Cell ID: 0

Data Reduction Parameters

Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K  
 Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure P/Po	Volume @ STP cc/g	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
5.22180e-02	1.6337	2.6983e+01
1.03741e-01	1.8459	5.0172e+01
1.53894e-01	2.0064	7.2534e+01
2.04774e-01	2.1554	9.5588e+01
2.52748e-01	2.3014	1.1759e+02
3.00874e-01	2.4630	1.3980e+02
3.47807e-01	2.6169	1.6305e+02
4.00270e-01	2.8162	1.8962e+02
4.49819e-01	3.0153	2.1695e+02
4.99881e-01	3.2447	2.4647e+02
5.48252e-01	3.4832	2.7878e+02

BET summary

Slope = 498.468  
 Intercept = -4.956e+00  
 Correlation coefficient, r = 0.998049  
 C constant = -99.574

Surface Area = 7.057 m<sup>2</sup>/g

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction  
for NOVA instruments  
©1994-2013, Quantachrome Instruments  
version 11.03

Analysis Report  
 Operator: quantachrome Date:2016/10/14 Operator: quantachrome  
 Date:2016/10/19  
 Sample ID: MB25 Filename: sttn\_B\_20161014\_1.qps  
 Sample Desc: Comment:  
 Sample weight: 0.3263 g Sample Volume: 1 cc  
 Outgas Time: 4.0 hrs OutgasTemp: 300.0 C  
 Analysis gas: Nitrogen Bath Temp: 273.0 K  
 Press. Tolerance:0.100/0.100 (ads/des)Equil time: 60/60 sec (ads/des) Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)  
 Analysis Time: 288.1 min End of run: 2016/10/14 19:54:50 Instrument: Nova Station B  
 Cell ID: 0

Data Reduction Parameters

Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K  
 Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure P/Po	Volume @ STP cc/g	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
5.02910e-02	1.7672	2.3976e+01
9.77670e-02	1.9809	4.3767e+01
1.52617e-01	2.1736	6.6296e+01
2.00529e-01	2.3317	8.6071e+01
2.50690e-01	2.4950	1.0729e+02
3.01906e-01	2.6716	1.2952e+02
3.49352e-01	2.8488	1.5080e+02
3.96675e-01	3.0336	1.7341e+02
4.49314e-01	3.2553	2.0054e+02
4.95620e-01	3.4688	2.2665e+02
5.47495e-01	3.7255	2.5985e+02

BET summary

Slope = 463.721  
 Intercept = -5.319e+00  
 Correlation coefficient, r = 0.997495  
 C constant= -86.182

Surface Area = 7.597 m<sup>2</sup>/g

## **ANEXO IV**

### **PROPOSTA COMERCIAL – PREÇO DA TONELADA DA ESCÓRIA**



ISO 9001:2000  
FS 530465

Matozinhos, 29 de Julho de 2015

A/C Sr. Abdias Magalhães

Ref.: Escória Moída 380 – EM 380

Prezado Senhor,

Conforme vossa solicitação segue cotação para fornecimento de escória moída:

#### 1. Preço, condição de pagamento e forma de carregamento

Item	Produto	Preço FOB	Impostos Inclusos	Volume	Forma de carregamento
1	EM 380 (padrão) FOB – Matozinhos/MG	R\$ 175,00/t	ICMS(18%); PIS/COFINS (9,25%)	400 t/mês	Carreta silo

\* Condição de pagamento: 30 dias

#### 2. Características do produto

##### - Escória moída 380 (padrão)

Finura <= 10% retido na peneira 325

Blaine >= 4000 cm<sup>2</sup>/g

#### 3. Reajuste

O reajuste no preço do produto será realizado mediante acordo entre as partes, objetivando manter equilíbrio econômico-financeiro.

#### 4. Validade da proposta

Esta proposta tem validade de 15 dias.

Colocamo-nos a disposição para qualquer esclarecimento.

Atenciosamente,

Vitor Mendes Melo  
Líder de Produção  
Polmix Concreto Ltda

Rodovia MG 424 – km 24,5 – Distrito Industrial – Matozinhos/MG  
CEP 35.720-000 – Tel. (31) 3712-9650 – Fax (31) 3712-9660

## **ANEXO V**

### **VERDÉS – RELATÓRIO DE MOAGEM DA ARDÓSIA EM MOINHO PENDULAR < 0,075mm**

	<b>Código:</b>	SE 17-15
	<b>Versão:</b>	1 / 14
	<b>Página:</b>	175/2
Assistência: Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Felipe Verdés - CDTFV		
Título: RELATÓRIO DE MOINHO PENDULAR 271		
<b>Cliente: UFMG - ARDÓSIA</b>		

## I .DADOS DO MATERIAL

1. Produto: ARDÓSIA BRITADA
2. Granulometria de entrada: 100% < 19 mm
3. Umidade residual de entrada: 0,10%

## II. DADOS DE MOAGEM

### 1. Moinho Modelo 271

- a. Motorização: motor elétrico de 30 CV, corrente Nominal de 44,1
- b. Amper/Rotação Nominal: 1180 rpm
- c. Rotação adotada pra teste: 1180 rpm.
- d. Consumo de corrente(set-point): 38 Amper.

### 2. Ventilador primário

- a. Potência do Motor Elétrico: 25CV, corrente Nominal de 37 A
- b. Rotação nominal: 1770 rpm.
- c. Rotação adotada pra teste: 1770 rpm.
- d. Consumo de corrente do Ventilador Primário: 28,5 Amper.

### 3. Rotação do Ventilador Secundário:

- a. Potência do Motor Elétrico: 10CV, corrente Nominal de 14,4 A
- b. Rotação nominal: 3500 rpm
- c. Rotação Adotada para teste: 3234 rpm
- d. Consumo de corrente do Ventilador Secundário: 15,2 Amper.

### 4. Separador Dinâmico

- a. Potência do Motor Elétrico: 7,5CV, corrente Nominal de 20 A
- b. Rotação do Separador Dinâmico: 1300 rpm.
- c. Rotação adotada para teste: 900 rpm
- d. Consumo de corrente do Separador Dinâmico: 7,05 Amper.

	<b>Código:</b>	SE 17-15
	<b>Versão:</b>	1 / 14
	<b>Página:</b>	2/2
Assistência: Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Felipe Verdés - CDTFV		
Título: RELATÓRIO DE MOINHO PENDULAR 271		
<b>Cliente: UFMG - ARDÓSIA</b>		

### 5. Circuito Pneumático/Tabela de depressão

Saída do Moinho Pendular(P4):.....	288 mmca.
Entrada do Ciclone(P5): .....	198 mmca.
Saída do Ciclone(P6): .....	423 mmca.
Entrada do Filtro Manga(P7): .....	18 mmca.
Saída do Filtro Manga(P8): .....	201 mmca.

### III. Resultados

Granulometria de Saída: 95% < 0,075mm  
 Umidade de Saída: 0,1 %  
 Produção: 350 k em 35 minutos = 0,600 ton/h.  
 Potência Consumida (efetiva): 25,9 CV

### IV. Observações

Pode haver contaminação na amostra de outros testes realizados no moinho

Itu, 10 de Abril de 2015.




---

Fabiana Garbelini Bomfim  
 Tec.Processos Cerâmicos Verdés  
 CREA-SP: 5.063.193.892

## **ANEXO VI**

### **VERDÉS – RELATÓRIO DE MOAGEM DA ARDÓSIA EM MOINHO PENDULAR < 0,044 mm**



	<b>Código:</b>	SE 17-15Rev1
	<b>Versão:</b>	1 / 14
	<b>Página:</b>	178/2
Assistência: Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Felipe Verdés - CDTFV		
Título: RELATÓRIO DE MOINHO PENDULAR 271		
<b>Cliente: UFMG - ARDÓSIA</b>		

## I .DADOS DO MATERIAL

1. Produto: ARDÓSIA BRITADA
2. Granulometria de entrada: 100% < 19 mm
3. Umidade residual de entrada: 0,39%

## II. DADOS DE MOAGEM

### 1. Moinho Modelo 271

- a. Motorização: motor elétrico de 30 CV, corrente Nominal de 44,1
- b. Rotação Nominal: 1180 rpm
- c. Rotação adotada para teste: 950 rpm.
- d. Consumo de corrente (set-point): 47 A.

### 2. Ventilador primário


- a. Potência do Motor Elétrico: 25CV, corrente Nominal de 37 A
- b. Rotação nominal: 1770 rpm.
- c. Rotação adotada para teste: 1770 rpm.
- d. Consumo de corrente do Ventilador Primário: 46 A.

### 3. Rotação do Ventilador Secundário:

- a. Potência do Motor Elétrico: 10CV, corrente Nominal de 14,4 A
- b. Rotação nominal: 3500 rpm
- c. Rotação Adotada para teste: 3500 rpm
- d. Consumo de corrente do Ventilador Secundário: 15,6 Amper.

### 4. Separador Dinâmico

- a. Potência do Motor Elétrico: 7,5CV, corrente Nominal de 20 A
- b. Rotação do Separador Dinâmico: 1300 rpm.
- c. Rotação adotada para teste: 2300 rpm
- d. Consumo de corrente do Separador Dinâmico: 7,05 Amper.

	<b>Código:</b>	SE 17-15Rev1
	<b>Versão:</b>	1 / 14
	<b>Página:</b>	179/2
Assistance: Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Felipe Verdés - CDTFV		
Título: RELATÓRIO DE MOINHO PENDULAR 271		
<b>Cliente: UFMG - ARDÓSIA</b>		

### 5. Circuito Pneumático/Tabela de depressão

Saída do Moinho Pendular(P4):.....	252 mmca.
Entrada do Ciclone(P5): .....	237 mmca.
Saída do Ciclone(P6): .....	417 mmca.
Entrada do Filtro Manga(P7): .....	13 mmca.
Saída do Filtro Manga(P8): .....	40 mmca.

### III. Resultados

Granulometria de Saída: 98,6% < 0,044mm  
 Umidade de Saída: 0,2 %  
 Produção: 856 kg em 57 minutos = 0,901 ton/h.  
 Potência Consumida (efetiva): 34 CV

### IV. Observações

Pode haver contaminação na amostra de outros testes realizados no moinho

Itu, 04 de Setembro de 2015.

Anselmo Saito  
 Verdés Assistance