CEFET-MG

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Luciano Fernandes de Magalhães

Avaliação do rejeito de minério de ferro como material cimentício suplementar

Belo Horizonte
2018

Luciano Fernandes de Magalhães

Avaliação do rejeito de minério de ferro como material cimentício suplementar

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais
Linha de Pesquisa: Seleção, Processamento e Caracterização
Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra
Co-orientadora: Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira

Belo Horizonte
2018

Magalhães, Luciano Fernandes de.

M188a Avaliação do rejeito de minério de ferro como material cimentício suplementar / Luciano Fernandes de Magalhães. – 2018.
86 f.: il.; fotos.; grafs.; tabs. –
Orientador: Augusto Cesar da Silva Bezerra
Co-orientadora: Michelly dos Santos Oliveira

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.
Bibliografia.

1. Rejeito de mineração. 2. Minérios de ferro. 3. Pozolana. 4. Cimento Portland. I. Bezerra, Augusto Cesar da Silva. II. Oliveira, Michelly dos Santos. III. Título.

CDD: 620.17

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CEFET-MG

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
"AVALIAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR"

Autor: Luciano Fernandes Magalhães

Orientador: Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Profª. Drª. Michelly dos Santos Oliveira (COORIENTADORA)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 07 de Fevereiro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças para vencer todas as dificuldades que me deparei durante o tempo da realização de mais esta etapa da minha vida;

Aos meus pais, José Humberto e Irene, e minha irmã, Lidiane, por todo o apoio e incentivo que me foi dado;

Agradeço imensamente meu orientador, Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra, por ter me dado a oportunidade de realizar esta pesquisa, por toda a paciência, confiança e todos os ensinamentos que foram imprescindíveis para a realização deste trabalho;

À Profª. Dra. Michelly dos Santos Oliveira, que aceitou a co-orientação desta pesquisa, e por todos os conselhos dados, meus mais profundos agradecimentos;

Às colegas de laboratório, Sâmara, Priscila e Isabella, agradeço por toda a ajuda que me foi dada e principalmente, pela amizade;

À mineradora Vallourec, pela doação da amostra de rejeito de minério de ferro, imprescindível para a realização desta pesquisa;

Ao Programa de Pós-graduação do CEFET-MG, pela disponibilização de bolsa de Mestrado.

RESUMO

O presente trabalho avaliou a possibilidade do uso de um rejeito de minério de ferro como material cimentício suplementar para substituição parcial do cimento Portland. O rejeito de minério de ferro foi processado por calcinação (500 e 750°C) e moagem (rejeitos *in natura* e 500°C). Para a caracterização foi realizada análise visual, microscopia eletrônica de varredura (MEV), granulometria a laser, difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X, análise termogravimétrica (TGA). Os rejeitos de minério de ferro *in natura* e calcinados tiveram sua pozolanicidade avaliada por meio do método de Luxan. Após a caracterização, os rejeitos foram utilizados na confecção de corpos de prova de argamassa com 10, 20 e 30% de substituição em peso do cimento Portland. Os compósitos foram submetidos a ensaio de compressão, com idades de 3, 7, 28 e 91 dias, ensaio de tração na flexão, com idades de 28 e 91 dias, e ensaios de absorção de água e ataque com ácido sulfúrico, com idades de 28 dias. O rejeito de minério de ferro é composto basicamente pelos minerais hematita, goethita, quartzo e caulinita. Os resultados do ensaio de Luxan mostrou que os rejeitos calcinados apresentam propriedades pozolânicas. Os resultados das propriedades mecânicas mostraram queda na resistência, mas com valores acima de 32MPa para as substituições de 30% aos 28 dias. A porosidade das argamassas não sofreu alterações significativas, como observado pelos resultados de ensaio de absorção de água e microscopia eletrônica de varredura das argamassas. Em relação à resistência química, a substituição do cimento tem efeito positivo quanto a perda de massa sofrida pela reação com ácido sulfúrico. De maneira geral, a utilização do rejeito de minério de ferro em substituição ao cimento em argamassas é uma alternativa viável para a imobilização deste resíduo industrial.

PALAVRAS-CHAVE: rejeito, minério de ferro, pozolana, material cimentício suplementar, cimento Portland

ABSTRACT

The present work evaluated the possibility of using an iron ore tailing as a supplementary cementitious material for partial replacement of Portland cement. The iron ore tailings were processed by calcining (500 and 750 ° C) and milling (in natura and 500 ° C). For the characterization, visual analysis, scanning electron microscopy (SEM), laser granulometry, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence, thermogravimetric analysis (TGA) were performed. The iron ore tailing in natura and calcined had their pozolanicity evaluated by the Luxan method. After the characterization, the tailings were used in the preparation of mortar specimens with 10, 20 and 30% weight substitution of Portland cement. The composites were submitted to compression tests, with ages of 3, 7, 28 and 91 days, flexural traction test, with ages of 28 and 91 days, and water absorption and sulfuric acid attack, with ages of 28 days. The iron ore tailings are composed mainly of the minerals hematite, goethite, quartz and kaolinite. The results of the Luxan test showed that the calcined tailings have pozzolanic properties. The results of the mechanical properties showed a decrease in resistance, but with values above 32MPa for the substitutions of 30% at 28 days. The porosity of the mortars did not undergo significant changes, as observed by the results of the water absorption test and scanning electron microscopy of the mortars. In relation to chemical resistance, cement substitution has a positive effect on the loss of mass suffered by the reaction with sulfuric acid. In general, the use of iron ore tailings instead of cement in mortars is a viable alternative for the immobilization of this industrial waste.

KEY WORDS: tailings, iron ore, pozzolana, supplementary cementitious material, Portland cement

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Por cento
ºC	Grau Celsius
mm	Milímetro
ml	Mililitro
m	Metro
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
#	*Mesh*
m^2/kg	Metro quadrado por quilograma
MPa	Megapascal
μm	Micrometro
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico
mS/cm	Milisiemens por centímetro

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PIB	Produto Interno Bruto
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
AIA	Avaliação de impacto ambiental
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
NBR	Norma Brasileira
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
USGS	U. S. Geological Survey
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
Fe_2O_3	Hematita
Fe_3O_4	Magnetita
FeOOH	Goethita
$FeCO_3$	Siderita
SiO_2	Quartzo
$Al(OH)_3$	Gibbsita
CaO	Óxido de cálcio
C_3S	Silicato tricálcico
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tetracálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
CO_2	Dióxido de carbono
RPM	Rotações por minuto

$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
$Al_2Si_2O_7$	Metacaulinita

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais métodos de disposição de rejeitos em Minas Gerais 19
Figura 2 - Fluxograma típico de planta de beneficiamento de minérios 24
Figura 3 - Diagrama esquemático de um jigue 25
Figura 4 - Diagrama de espiral concentradora 26
Figura 5 - Diagrama de separador magnético de tambor 28
Figura 6 - Diagrama de separador magnético tipo carrossel 28
Figura 7 - Equipamentos utilizados em flotação (A) célula e (B) coluna 30
Figura 8 - Fluxograma do processo de beneficiamento da mineradora Vallourec 31
Figura 9 - Processo de fabricação do cimento Portland 33
Figura 10 - Fluxograma das atividades 43
Figura 11 - Ponto de coleta do rejeito de minério de ferro 45
Figura 12 - Moinho planetário e componentes 48
Figura 13 - Relação entre tempo de moagem e tamanho de partícula 48
Figura 14 - Microscópio eletrônico de varredura 50
Figura 15 - Difratômetro de raios X 51
Figura 16 - Granulômetro a laser 52
Figura 17 - Analisador térmico diferencial e termogravimétrico 53
Figura 18 - Ensaio Luxan 54
Figura 19 - Moldes cilíndrico (A) e prismático (B) 55
Figura 20 - Ensaio de índice de consistência 57
Figura 21 - Ensaio de compressão axial 57
Figura 22 - Ensaio de flexão 58
Figura 23 - Ensaio de absorção de água 59
Figura 24 - Amostras de rejeito de minério de ferro in natura e calcinadas 61
Figura 25 - Micrografia das amostras de rejeito in natura(A) e calcinadas a 500 (B) e 750°C (C) 62
Figura 26 - Difratogramas das amostras de rejeito de minério de ferro in natura (A) e calcinadas (B) e (C) 64
Figura 27 - Curvas granulométricas dos rejeitos e do cimento Portland 65
Figura 28 - Curvas de análise termogravimétrica das amostras de rejeito 66
Figura 29 - Espalhamentos médios das argamassas 69

Figura 30 - Resultados do ensaio de resistência à compressão para os traços de 10% (A), 20% (B) e 30% (C) 70
Figura 31 - Resultados do ensaio de flexão para idades de 28 dias (A) e 90 dias (B) 71
Figura 32 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água 72
Figura 33 - Perdas de massa nas argamassas após ataque ácido 73
Figura 34 - Corpos de prova de referência (A), 10% (B), 20% (C) e 30% (D) após ataque ácido 74
Figura 35 - Micrografias obtidas das argamassas de referência (A) e 10% com rejeitos in natura (B), 500° (C) e 750° (D)..... 76
Figura 36 - Micrografias obtidas das argamassas de 20% com rejeitos in natura (A), 500° (B) e 750° (C) 77
Figura 37 - Micrografias obtidas das argamassas 30% com rejeitos in natura (A), 500° (B) e 750° (C) 78
Figura 38 - Micrografia das argamassas de referência (A) e 10% com rejeitos in natura (B), 500° (C) e 750° (D) após ataque ácido..... 79
Figura 39 - Micrografia das argamassas de 20% com rejeitos in natura (A), 500° (B) e 750° (C) após ataque ácido..... 80
Figura 40 - Micrografia das argamassas de 30% com rejeitos in natura (A), 500° (B) e 750° (C) após ataque ácido em região de maior desgaste 81
Figura 41 - Micrografia das argamassas de 30% com rejeitos in natura (A), 500° (B) e 750° (C) após ataque ácido em região de menor desgaste..... 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos minerais encontrados nos rejeitos de minério de ferro 22
Tabela 2 - Sequência de reações no processo de calcinação 34
Tabela 3 - Exigências físicas estabelecidas para materiais pozolânicos 36
Tabela 4 - Exigências químicas estabelecidas para materiais pozolânicos 37
Tabela 5 - Materiais utilizados 44
Tabela 6 - Propriedades físicas do cimento Portland 45
Tabela 7 - Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade 53
Tabela 8 - Composição das argamassas 55
Tabela 9 - Relação entre corpos de prova e ensaios realizados 56
Tabela 10 - Composição química (semi-quantitativa) da amostra de rejeito 63
Tabela 11 - Resultados do ensaio de Luxan 68

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO 15
1.1 – Estrutura do trabalho 16
2 – OBJETIVOS 17
2.1 - Objetivo geral 17
2.2 - Objetivos específicos 17
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
3.1 – Disposição de rejeitos de minério de ferro 18
3.2 – Aspectos gerais do minério de ferro 21
3.3 – Técnicas de beneficiamento mais utilizadas na concentração de minério de ferro 23
3.3.1 – Métodos gravíticos 24
3.3.2 – Métodos magnéticos 27
3.3.3 – Flotação 29
3.3.4 – Fluxograma de beneficiamento da Vallourec Mineração 31
3.4 – Cimento Portland 33
3.5 – Pozolanas 35
3.5.1 – Reação pozolânica 35
3.6 – Estudos envolvendo resíduos da mineração de ferro 40
4 – MATERIAIS E MÉTODOS 43
4.1 – Materiais 43
4.1.1 – Rejeito de minério de ferro 44
4.1.2 – Cimento Portland 45
4.1.3 – Areia 45
4.1.4 – Água 46
4.1.5 – Hidróxido de cálcio 46
4.1.6 – Ácido sulfúrico 46
4.2 – Métodos 46
4.2.1 – Preparação e processamento do rejeito de minério de ferro 47
4.2.2 – Caracterização do rejeito de minério de ferro 49
4.2.3 – Moldagem das argamassas 54

4.2.4 – Caracterização das argamassas e dos corpos de prova 56
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES 61
5.1 – Caracterização química e mineralógica do rejeito de minério de ferro . 61
5.1.1 – Análise visual 61
5.1.2 – Microscopia eletrônica de varredura 61
5.1.3 – Fluorescência de raios-x 62
5.1.4 – Difração de raios-x 63
5.1.5 – Análise granulométrica 65
5.1.6 – Análise termogravimétrica 66
5.1.7 – Luxan 67
5.2 – Caracterização dos corpos de prova 69
5.2.1 – Índice de consistência 69
5.2.2 – Resistência à compressão 69
5.2.3 – Resistência à flexão 71
5.2.4 – Absorção de água e índice de vazios 72
5.2.5 – Ataque ácido 73
5.2.6 – Microscopia eletrônica de varredura 75
CONCLUSÕES 83
REFERÊNCIAS 84

1 – INTRODUÇÃO

Atualmente, o ferro ocupa lugar de destaque nas exportações de produtos minerais explotados no Brasil, respondendo por mais de 60% das rendas geradas pelas exportações (IBRAM, 2016). O Brasil está entre os maiores produtores de minério de ferro do mundo, sendo que em 2015 a produção brasileira foi estimada em 428 milhões de toneladas, representando 12% da produção mundial. Com relação às reservas minerais, o Brasil possui cerca de 23 bilhões de toneladas de minério de ferro, estando atrás somente da Rússia e Austrália (USGS, 2016).

A indústria da mineração exerce um papel fundamental na geração de riquezas por meio da exploração dos recursos naturais presentes na Terra, muitas vezes compondo grande parte do Produto Interno Bruto (PIB) de um país. O aumento da produção de ferro fez com que a interação da atividade mineradora com o meio ambiente seja de grande interesse. A mineração de ferro apresenta um papel fundamental no desenvolvimento de uma sociedade, porém traz grandes impactos ambientais devido à modificação de áreas de grandes extensões. A recuperação da área minerada torna-se muito difícil e dispendiosa, considerando o grande volume de material escavado, e mesmo que medidas corretivas sejam tomadas, a região dificilmente volta a ter suas características originais (FONTES, 2013).

Um dos principais aspectos ambientais observados na mineração de ferro é a geração de resíduos. Para que a indústria siderúrgica possa produzir o ferro metálico e suas ligas, é necessário que a matéria-prima vinda da mineradora possua o mínimo de impurezas possíveis. A remoção dessas impurezas se dá numa fase conhecida como beneficiamento ou tratamento de minérios. Após o minério passar pelo beneficiamento, todo o material que não pode ser aproveitado economicamente é descartado como rejeito. Este rejeito possui granulometria mais fina que o solo original, e seu descarte incorreto pode gerar grandes impactos ambientais. Em grande parte das mineradoras o rejeito é armazenado em barragens, na forma de polpa (água contendo minerais em suspensão).

Com a crescente demanda de ferro pela sociedade moderna, minérios com teores cada vez mais baixos estão sendo explotados, gerando enormes quantidades de

rejeitos, requerendo barragens cada vez maiores para sua contenção. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a utilização do rejeito de minério de ferro como material cimentício suplementar, visto que o setor de construção civil possui grande potencial para utilização de resíduos.

1.1 – Estrutura do trabalho

O trabalho é estruturado em seis capítulos. No capítulo 1 é apresentada uma breve introdução e relevância do tema em questão. No capítulo 2 são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos. No capítulo 3 é feita a revisão bibliográfica, abordando informações pertinentes à pesquisa, como cenário atual de disposição e características do minério de ferro, métodos de beneficiamento mais utilizados, sobre cimento e suas adições minerais e pesquisas desenvolvidas sobre diferentes utilizações dos resíduos de mineração de ferro. No capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa, e os resultados são mostrados e discutidos no capítulo 5. Finalmente no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 – OBJETIVOS

2.1 - Objetivo geral

- Avaliar o potencial de utilização do rejeito de minério de ferro como material cimentício suplementar.

2.2 - Objetivos específicos

- Processar amostras de rejeito de minério de ferro por moagem e calcinação;
- Caracterizar as amostras de rejeito de minério de ferro *in natura* e calcinadas, para conhecimento de sua granulometria, composição química, mineralógica e morfológica;
- Avaliar o índice de atividade pozolânica do rejeito de minério de ferro pelo método de Luxan;
- Avaliar a influência da substituição do cimento pelo rejeito, quanto à trabalhabilidade, resistência mecânica, absorção de água e resistência ao ataque ácido.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Disposição de rejeitos de minério de ferro

A produção de minério de ferro reúne em seu processo produtivo o desenvolvimento (aberturas de vias de acesso, construção das edificações, remoção do decapeamento, etc), lavra do minério, beneficiamento e venda do produto concentrado. Durante a etapa de preparação da área, o material que não possui valor econômico, denominado estéril, é removido para liberar o acesso ao corpo de minério. O estéril removido é geralmente disposto em forma de pilhas, nas proximidades da cava, para diminuir os custos de transporte. A extração do minério pode ser realizada a céu aberto ou de forma subterrânea, a depender da posição espacial em que o corpo de minério se encontra (CURI, 2014).

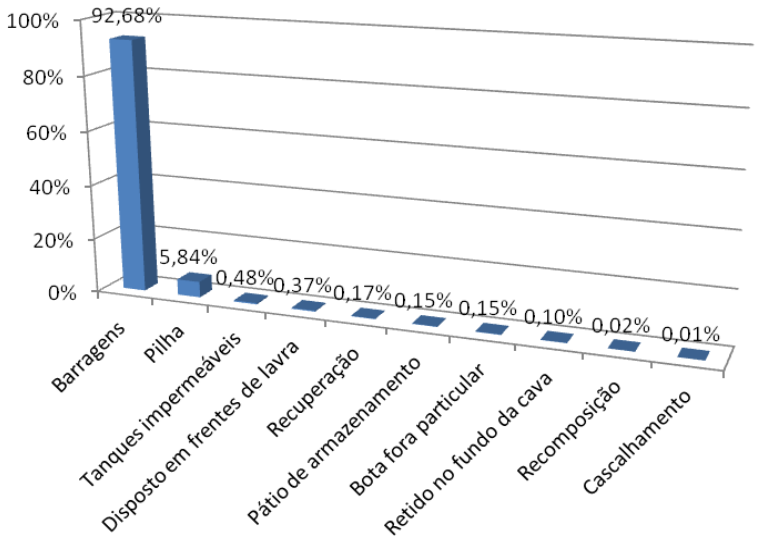
O beneficiamento é definido como o conjunto de operações básicas que têm como objetivo aumentar o teor do mineral de interesse no concentrado, transformando bens minerais brutos em produtos de qualidade que atendem às especificações dos demais setores industriais (ARAÚJO, 2007).

Durante o processo é gerado um resíduo que não possui teor de minerais de interesse suficientemente alto para que possa ter valor econômico apreciável. Este resíduo é chamado de rejeito, e é posteriormente descartado após o beneficiamento. Em função do tipo de minério e dos métodos adotados durante as operações de beneficiamento, podem ser encontrados rejeitos com as mais variadas características físico-químicas e granulométricas. O rejeito pode ser classificado como lama, quando possui granulometria mais fina, ou como rejeito granulado, quando possui granulometria acima de 0,064mm (ESPÓSITO, 2000).

A seleção do tipo de disposição dos rejeitos depende de uma série de fatores, como natureza do processo de beneficiamento, condições geológicas e topográficas da região e potencial de impacto ambiental que o rejeito possui. O método de disposição de rejeitos mais utilizado é em barragens. Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2016a), o principal método de disposição de rejeitos de mineração

no estado de Minas Gerais é em barragens de contenção, respondendo por mais de 92% dos resíduos gerados, conforme mostrado no gráfico ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Principais métodos de disposição de rejeitos em Minas Gerais



Fonte: Adaptado de FEAM (2016a)

As barragens podem ser construídas com solo, estéril ou até mesmo com o próprio rejeito resultante do beneficiamento. Davies e Martin (2000) afirmam que devido ao alto volume de rejeitos gerados e o custo de movimentação para disposição final, o uso do rejeito para a construção das barragens torna-se economicamente viável, desde que obedecidas condições geotécnicas para a estabilidade da barragem. Assim, controle de processos de separação granulométrica, utilização de sistemas de drenagem eficientes, compactação do rejeito e proteção superficial da barragem são aspectos de fundamental importância para garantir o uso dos resíduos na construção da barragem. De acordo com Duarte (2008) e Silva (2007), as barragens de rejeito são empreendimentos que apresentam significativos impactos ambientais associados, como remoção da fauna e flora do local durante a construção, poluição de águas subterrâneas e superficiais durante a operação e após o encerramento das atividades, geração de poeira nas praias de rejeito e o impacto visual.

As barragens de rejeito podem gerar impactos ambientais de grandes proporções em caso de acidentes. O gerenciamento destes empreendimentos é de fundamental importância durante toda sua vida útil, desde a escolha do local de implantação,

construção, operação e desativação. Dentre as normas adotadas no Brasil para garantir a fiscalização e segurança das barragens, destacam-se:

- Lei Federal n. 6938/81 - estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e inclui, em seu Art. 18, a Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) como parte integrante do processo de licenciamento de atividades e empreendimentos efetiva ou potencialmente poluidores ou causadores de degradação ambiental;
- Resolução CONAMA n. 01/86 – estabelece critérios básicos e diretrizes para o uso e implementação da AIA;
- Lei Federal n. 12334/10 – estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB);
- Deliberação Normativa COPAM n. 87/05 do estado de Minas Gerais – dispõe sobre o cadastro estadual de barragens.

O Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) elaborou a Deliberação Normativa nº 62, de 17 de setembro de 2002, que dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais. Esta deliberação determina que se tenha conhecimento do acervo de barragens de rejeito, estabelece critérios de classificação das barragens, desenvolvimento de mecanismos de segurança durante a construção, a operação, o fechamento e ainda estabelece a implantação de sistemas de gestão de risco das barragens (FEAM, 2016b). As barragens podem então ser classificadas em três classes, de acordo com seu potencial de impacto ambiental:

- Classe I – Baixo potencial de dano ambiental;
- Classe II – Médio potencial de dano ambiental;
- Classe III – Alto potencial de dano ambiental.

No ano de 2015, 27,5% das barragens entraram na Classe I, 41,8% entraram na Classe II e 30,7% na Classe III (FEAM, 2016b).

O conhecimento sobre os fatores que controlam o comportamento das barragens de contenção de rejeitos cresceu bastante nos anos, tornando os gerenciadores mais conscientes dos riscos envolvidos nas construções dos reservatórios. A probabilidade de uma falha ocorrer pode ser baixa, porém as consequências podem ser desastrosas para as comunidades locais e para o meio ambiente (DUARTE, 2008).

O caso mais recente de acidente ocorrido no Brasil foi o rompimento da barragem de Fundão, operada pela mineradora Samarco, no município de Bento Rodrigues, em 5 de novembro de 2015. A barragem tinha 100m de altura e possuía capacidade de armazenamento de 45.000.000m³, sendo classificada como estrutura Classe III. A barragem recebia o rejeito da concentração de minério de ferro beneficiado pela mineradora. O rompimento da barragem de Fundão causou efeito em cadeia, atingindo a barragem Santarém localizada a jusante e que armazenava água. A água diluiu o rejeito, aumentando a velocidade da lama. A cidade de Bento Rodrigues foi completamente devastada pela lama, resultando em 17 mortes e 2 pessoas desaparecidas (FEAM, 2016b).

3.2 – Aspectos gerais do minério de ferro

Segundo Jesus (2015), as reservas brasileiras de minério de ferro apresentam teor médio de 49% de ferro, representando 12% do total mundial. Os principais estados brasileiros produtores de ferro são Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará. Os minérios de ferro brasileiros podem ser classificados como hematíticos e itabiríticos, a depender de suas características. Os minérios hematíticos possuem composição mineralógica mais homogênea e com maior teor de ferro (em torno de 64,8%), sendo predominante a presença de hematita. Estes minérios geralmente dispensam a necessidade de processos de concentração, sendo necessária somente uma etapa de adequação de granulometria, por britagem e classificação. Os minérios itabiríticos são mais heterogêneos, e possuem menor teor de ferro (46,3%) que os minérios hematíticos, sendo compostos por óxidos e hidróxidos de ferro, sendo assim necessário que este passe por processo de concentração mineral. O estado do Pará possui reservas contendo minério de ferro hematítico, enquanto Mato Grosso do Sul

e Minas Gerais possuem suas reservas compostas por minérios itabiríticos. Outros minerais de ferro também ocorrem em conjunto com esses minérios, como a magnetita (Fe_3O_4), a goethita (FeOOH) e a siderita ($FeCO_3$) (ANDRADE, 2014).

O minério itabirítico passa pelo processo de beneficiamento para aumentar o teor de ferro no produto final. O rejeito gerado contém diferentes minerais associados e que não apresentam valor econômico. Entre os minerais normalmente presentes nos rejeitos de minério de ferro citam-se caulinita, gibbsita e quartzo, além de hematita, magnetita e goethita, visto que o processo de beneficiamento não é 100% eficiente. As fórmulas e composições químicas destes minerais são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química dos minerais encontrados nos rejeitos de minério de ferro

Mineral	**Fórmula Química**	**Composição**
Caulinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	39% de Al_2O_3 46,5% de SiO_2 14,0% de H_2O
Gibbsita	$Al(OH)_3$	65,4% de Al_2O_3 34,6% de H_2O
Goethita	FeO(OH)	90,0% de Fe_2O_3 10,0% de H_2O
Hematita	Fe_2O_3	70,0% de Fe 30,0% de O
Magnetita	Fe_3O_4	31,0% de FeO 69,0% de Fe_2O_3
Quartzo	SiO_2	46,74% de Si 53,26% de O

Fonte: (MACHADO *et al.*, 2003)

A demanda cada vez maior da sociedade por ferro vem forçando as mineradoras a explotarem minérios com teores mais baixos. O que se observa é que o teor de ferro no rejeito do beneficiamento muitas vezes é compatível com minérios de teores mais baixos. Wolff (2009) analisou rejeitos de nove plantas de beneficiamento de minério de ferro realizadas pelo grupo VALE Fertilizantes. A autora observou teores variando entre 44,3 a 64% de ferro presente nos rejeitos.

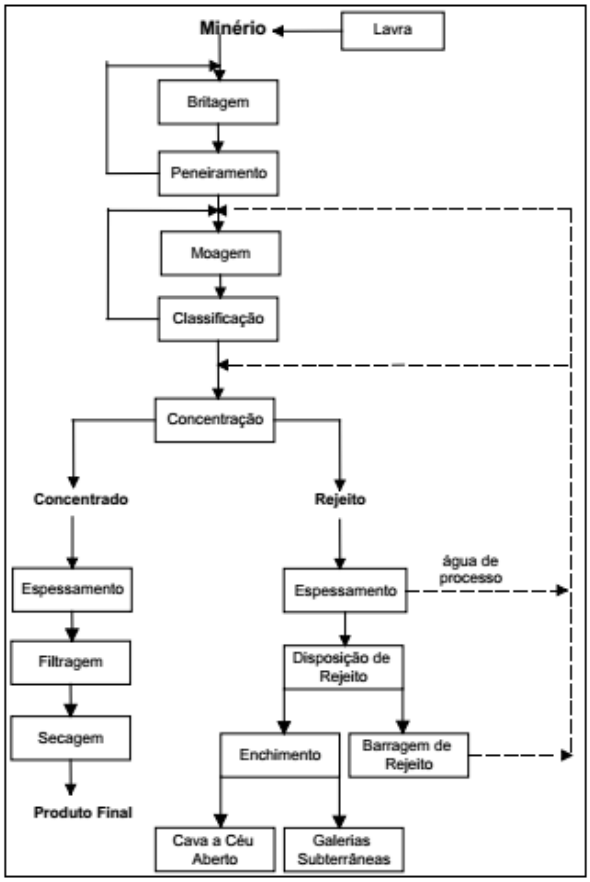
A utilização do rejeito apresenta potencial de ganhos econômicos, devido ao alto valor

agregado que possui. Os rejeitos de mineração de ferro constituem material de grande interesse para utilização na construção civil, desde que observadas as características geotécnicas. As características químicas dos rejeitos são bem próximas dos materiais utilizados na fabricação de cerâmicas, sendo este um uso possível para este material. Há também a possibilidade de utilização do rejeito na fabricação do cimento, substituindo o ferro adicionado na fabricação deste (COELHO, 2008).

3.3 – Técnicas de beneficiamento mais utilizadas na concentração de minério de ferro

O beneficiamento consiste de uma série de operações aplicadas aos minérios, com objetivo de modificar a granulometria e a concentração relativa das espécies minerais, sem modificação química dos mesmos. As operações de concentração baseiam-se nas diferenças das propriedades entre os minerais-minério (aquele que possui valor econômico) e os minerais de ganga (minerais sem valor agregado). Dentre essas propriedades destacam-se a massa específica, a susceptibilidade magnética, a condutividade elétrica e as propriedades químicas de superfície (LUZ e LINS, 2010). A Figura 2 apresenta um fluxograma típico de uma planta de beneficiamento de minérios.

Figura 2 - Fluxograma típico de planta de beneficiamento de minérios



Fonte: LUZ e LINS, 2010

A fase inicial do beneficiamento conta com a cominuição do minério, a fim de liberar as espécies minerais, fazendo com que apresentem somente uma fase mineralógica, aumentando a eficiência do processo. O minério sofre redução de granulometria através de britadores e moinhos, sendo posteriormente classificado pelo tamanho de partícula adequado ao processo. A concentração do minério de ferro itabirítico é realizado por métodos gravíticos, magnéticos e por flotação, quando apresenta faixa granulométrica grosseira, intermediária e fina (*pellet feed*), respectivamente.

3.3.1 – Métodos gravíticos

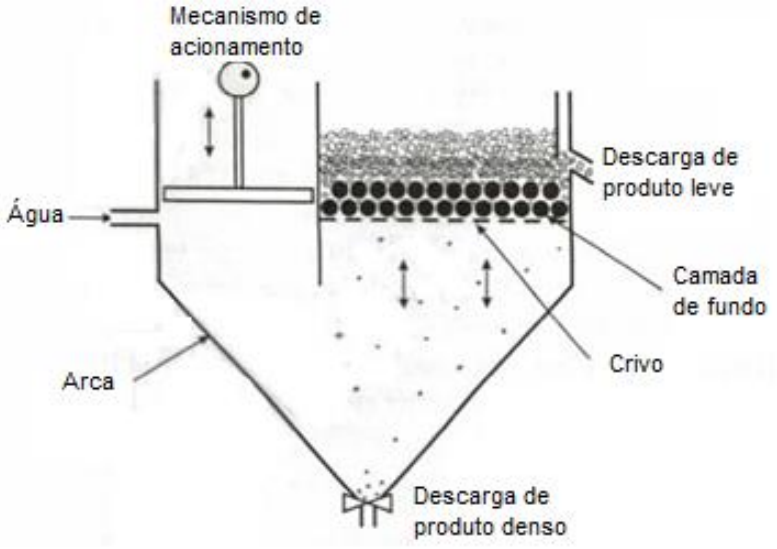
Os processos de concentração mineral que se baseiam nas diferenças entre os pesos específicos das espécies minerais são os mais importantes em termos de quantidade de material processado e de menor custo em termos de investimento e operação. Na

concentração de minério de ferro, os equipamentos de separação gravítica mais utilizados são o jigue e as espirais concentradoras.

3.3.1.1 – Jigue

Os jigues são equipamentos de concentração mineral que fazem a separação hidráulica das espécies minerais pelas diferenças de densidade existentes entre elas. A Figura 3 apresenta o diagrama esquemático do jigue. O equipamento consiste de uma câmara que é dividida em duas seções, separadas por um crivo. Sobre o crivo é recebida a polpa contendo os minerais a serem separados. Na outra parte do equipamento está presente o mecanismo de acionamento, responsável por gerar pulsações na água que preenche a câmara. A pulsação da água gera um movimento de ascensão nas partículas sobre o crivo, que ao voltarem para a posição inicial, sofrem estratificação em função da densidade. O mecanismo responsável pela geração da pulsação pode ser do tipo pistão, diafragma e pneumático. As partículas mais densas se posicionam abaixo das partículas menos densas, sendo descarregadas na parte inferior do equipamento (TAVARES e SAMPAIO, 2005). No Brasil, os jigues utilizados para a concentração de minérios de ferro são os do tipo Baum e Wenco-Remmer.

Figura 3 - Diagrama esquemático de um jigue

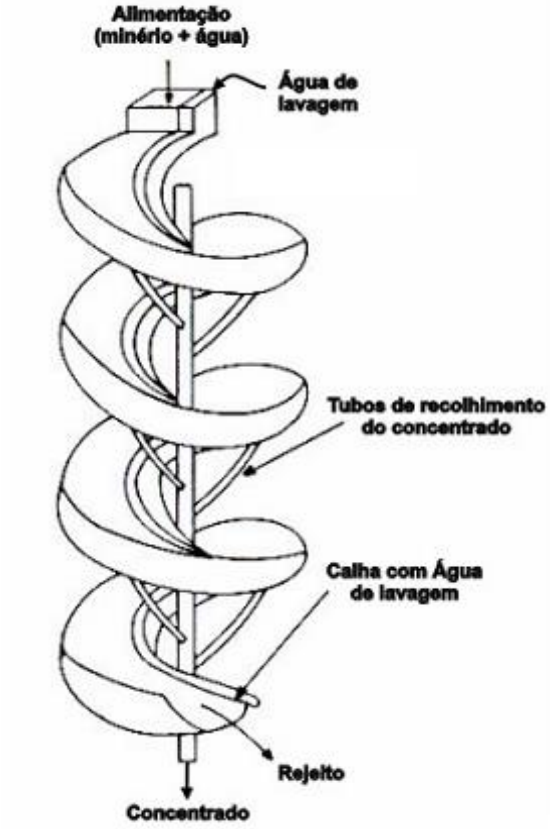


Fonte: TAVARES e SAMPAIO, 2005

3.3.1.2 – Espiral concentradora

Outro equipamento utilizado para concentração por diferença de densidade é a espiral concentradora. Estes são equipamentos construídos na forma de um canal helicoidal de seção semicircular. A polpa é alimentada na parte superior do equipamento, e escoa por gravidade. A velocidade do escoamento é mínima na superfície da calha e máxima na interface com o ar. Os minerais presentes na polpa sofrem estratificação, e os mais densos tendem a permanecer em contato com a calha, enquanto os menos densos ocupam a posição superior. Outro fenômeno que ocorre durante o movimento de escoamento da polpa é a força centrifuga, que move os minerais menos densos horizontalmente para a parte externa da calha. Os minerais densos permanecem na parte interior do equipamento, e são removidos por canaletas presentes nessa região. A Figura 4 ilustra o diagrama de uma espiral concentradora (LINS, 2010).

Figura 4 - Diagrama de espiral concentradora



Fonte: Adaptado de LINS, 2010

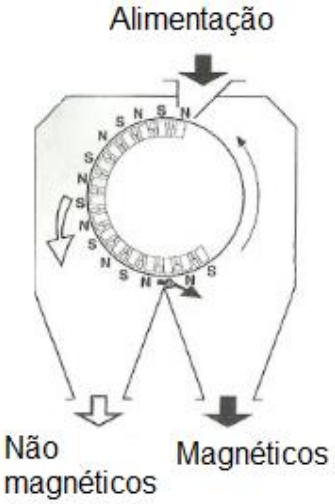
3.3.2 – Métodos magnéticos

A separação magnética é um método de beneficiamento mineral que utiliza a propriedade de susceptibilidade magnética dos minerais para realizar a classificação. Os minerais podem ser separados em três classes: os ferromagnéticos, que são fortemente atraídos por um campo magnético, os paramagnéticos, que são fracamente atraídos, e os diamagnéticos, que são repelidos por um campo magnético. Os equipamentos utilizados para separação magnética são classificados de acordo com o campo magnético que geram, podendo ser de alta e baixa intensidade, operando a úmido ou a seco. Os mais utilizados na mineração são os separador de tambor (baixa intensidade) e o separador tipo carrossel (alta intensidade).

3.3.2.1 – Baixo campo magnético

O separador magnético de tambor possui em seu interior magnetos permanentes, ou bobinas, que geram um campo magnético dependendo da posição em que se encontra. A alimentação do equipamento é feita na parte superior do tambor. As partículas magnéticas são atraídas pelo campo para a superfície do tambor, enquanto as não magnéticas seguem livremente. A medida que o tambor gira, as partículas magnéticas saem da região de atuação do campo magnético, e são descarregadas do equipamento (CHAVES e CHAVES FILHO, 2013). Este tipo de equipamento é indicado para a separação de magnetita, visto que este mineral é ferromagnético e é facilmente atraído por um campo magnético de baixa intensidade. O diagrama do separador de tambor é mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama de separador magnético de tambor

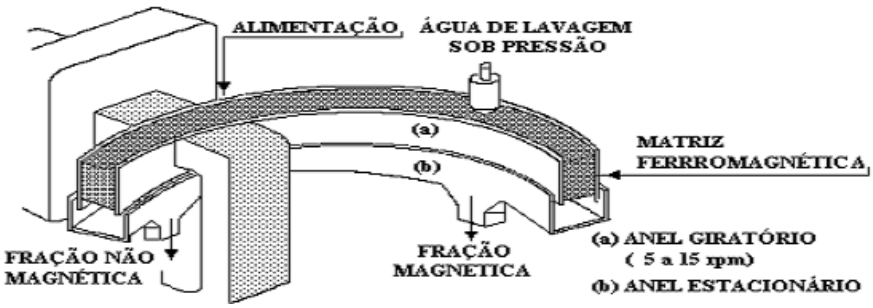


Fonte: Adaptado de CHAVES e CHAVES FILHO, 2013

3.3.2.2 – Alto campo magnético

O separador tipo carrossel consiste de um anel rotativo que possui matrizes ferromagnéticas. A alimentação do equipamento é feita em uma região onde existe um campo magnético de alta intensidade, e as partículas magnéticas aderem na matriz. Pelo movimento de rotação do anel, as partículas aderidas na matriz saem da região de influência do campo, e são removidas por um jato de água pressurizada, sendo coletadas por uma calha existente na parte inferior do anel. Este separador é indicado apenas para partículas paramagnéticas, como a hematita. Minerais ferromagnéticos podem não se soltar da matriz com o jato de água, podendo causar perda de eficiência do equipamento. O diagrama do separador magnético tipo carrossel é mostrado na Figura 6 (SAMPAIO *et al.*, 2010).

Figura 6 - Diagrama de separador magnético tipo carrossel



Fonte: SAMPAIO *et al.*, 2010

3.3.3 – Flotação

A flotação é uma das mais eficientes técnicas de concentração mineral utilizadas, sendo também a mais complexa. Devido sua ampla aplicabilidade, precisão na separação e maior tolerância a minérios com granulometria fina, a flotação vem ganhando cada vez mais espaço na indústria mineral.

O processo se desenvolve onde as três fases da matéria estão presentes, sendo o estado gasoso representado pelo ar (apolar), o estado sólido representado pelas partículas minerais (polares e apolares) e o estado líquido é representado pela água (polar). A superfície dos minerais geralmente é polar, devido à quebra das ligações químicas na etapa da moagem (PERES, 2007).

Substâncias polares interagem somente com outras substâncias polares, e o mesmo ocorre com as apolares. A flotação utiliza este princípio para a concentração dos minerais de interesse. As partículas apolares (hidrofóbicas) interagem com o ar, e aderem nas bolhas em ascensão na polpa. As partículas polares (hidrofílicas) permanecem em suspensão, cercadas de moléculas de água (PERES, 2007).

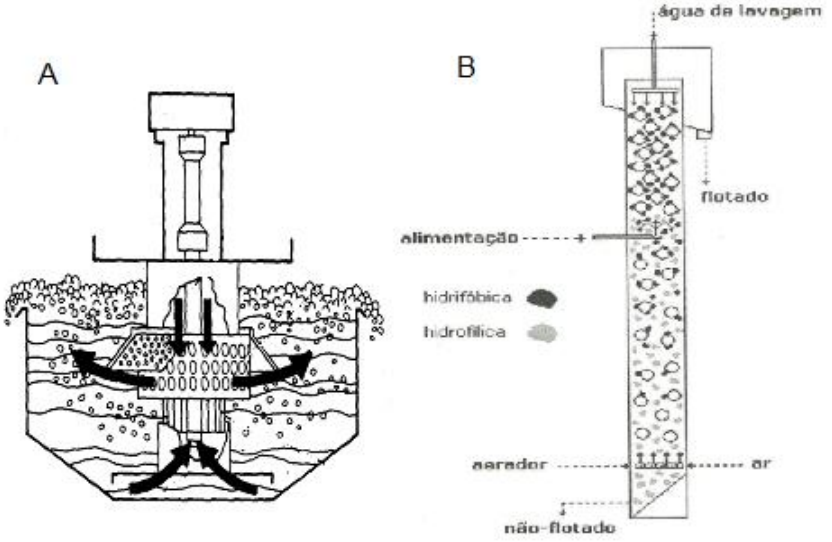
A grande maioria dos minerais existentes é naturalmente hidrofílica, mas o uso de determinados reagentes consegue manipular a química superficial das partículas, tornando-as hidrofóbicas, permitindo assim que o processo de flotação ocorra (BALTAR, 2010).

Os reagentes que interagem na interface sólido-líquido são conhecidos como coletores ou depressores, quando sua função é fazer com que a partícula se torne hidrofóbica ou hidrofílica, respectivamente. Outro reagente importante no processo é o espumante, que age na interface líquido-gás, tendo a função de reduzir a tensão superficial do líquido, aumentando a estabilidade da espuma, impedindo que as bolhas estourem e as partículas coletadas retornem para a suspensão (PERES, 2007). A Figura 7A apresenta o diagrama de uma célula de flotação.

O rotor existente no interior da célula tem a função de succionar o ar para a geração

das bolhas, e para manter certo grau de agitação, impedindo a sedimentação das partículas. Durante a subida até a superfície, as bolhas coletam as partículas hidrofóbicas, que são removidas junto com a espuma na parte superior da célula. As partículas hidrofílicas permanecem na suspensão, passando para a próxima célula. Este tipo de equipamento é utilizado na forma de bancada, sendo várias células interligadas para aumentar a efetividade do processo (BALTAR, 2010).

Figura 7 - Equipamentos utilizados em flotação (A) célula e (B) coluna



Fonte: Adaptado de BALTAR, 2010; CHAVES, 2010

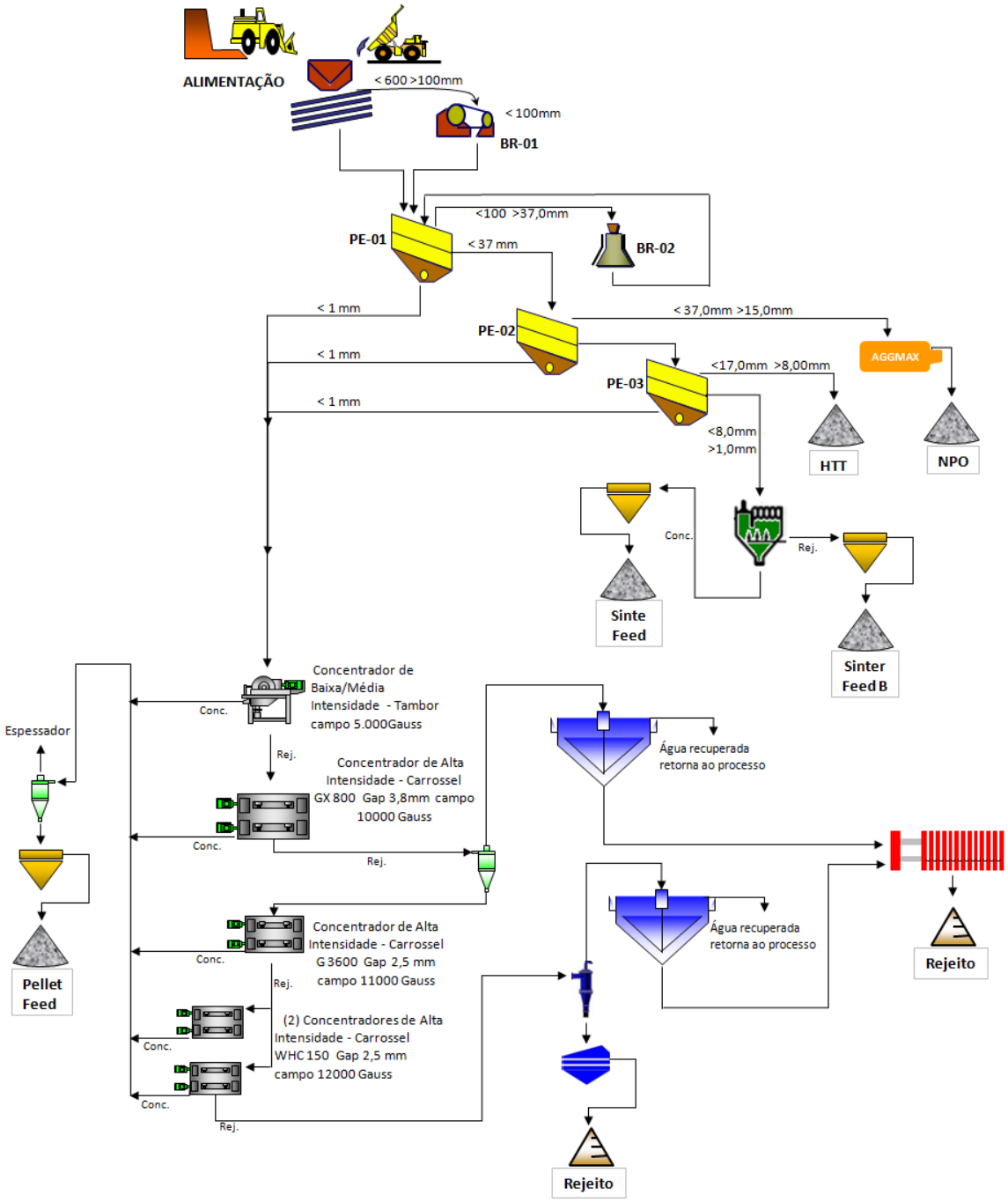
As colunas de flotação são equipamentos relativamente novos, indicados para a flotação de partículas finas. Não há sistema de agitação, devido ausência de rotor. Microbolhas são geradas por um aerador localizado na parte inferior da coluna. Estes equipamentos possuem de 10 a 15m de altura, e a alimentação da polpa é feita em um ponto situado a 2/3 da base da coluna, aumentando as chances das partículas hidrofóbicas serem coletadas. A coluna de flotação está esquematizada na Figura 7B (BALTAR, 2010).

O método de flotação aplicado aos minérios de ferro geralmente é a flotação reversa, na qual o concentrado permanece na polpa, enquanto os minerais de ganga são removidos na espuma. Os reagentes utilizados para este fim são a amina (coletor do quartzo) e o amido (depressor da hematita) (LOPES, 2009).

3.3.4 – Fluxograma de beneficiamento da Vallourec Mineração

Na Figura 8 é apresentado o fluxograma das operações de beneficiamento do minério de ferro da mineradora Vallourec.

Figura 8 - Fluxograma do processo de beneficiamento da mineradora Vallourec



Fonte: Vallourec Mineração, 2017

O ROM (*Run of Mine*) é carregado para dois alimentadores, e segue para o britador primário, que cominui o minério em partículas de tamanho inferior a 100mm. Logo depois o minério passa pelas peneiras primárias, que assim como as demais, possui dois *decks*.

A primeira tela dessas duas peneiras é de 37mm, então, o que é superior a essa granulometria fica retido no primeiro *deck* e vai para o britador secundário. O produto com granulometria inferior a 37mm passa pelas peneiras secundárias, onde a primeira tela, de 12mm, classifica o retido em NPO (produto granulado). O retido no segundo deck (menor que 12mm) vai para as peneiras terciárias.

O primeiro deck das peneiras terciárias classifica o produto hematitinha, correspondente ao retido na tela de 6,35mm. O *Sinter Feed* Grosso (SFG) é o retido no *deck* inferior, entre as telas de 6,35mm e 1,0mm. Este passa pelo processo de jigagem, que gera um concentrado e um rejeito. Separadamente, estes passam por peneiras desaguadoras e são empilhados. O concentrado irá formar o Produto *Sinter Feed* e o rejeito irá para a pilha de rejeitos do jigue.

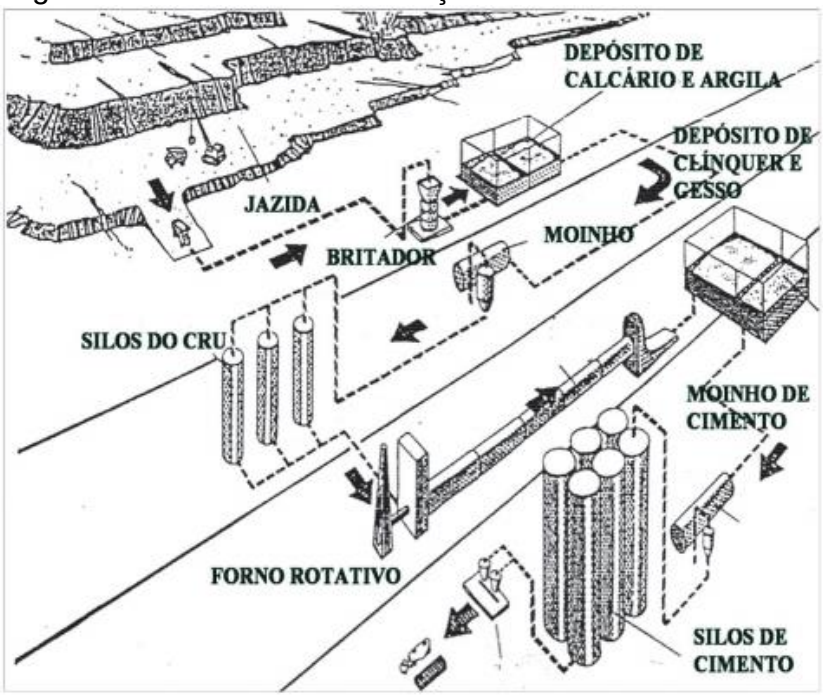
O passante das telas de 1mm situadas na parte inferior de todas as peneiras passa por processos de concentração magnética. Esse processo se inicia com oito tambores magnéticos de média intensidade (aproximadamente 5.000 Gauss), o concentrado destes é separado, e o rejeito segue para um carrossel denominado SM 05, que possui abertura de 3,8mm e campo de aproximadamente 10.000 Gauss. O concentrado deste é adicionado ao dos tambores e o rejeito passa por processo de ciclonagem para adensamento e posterior alimentação do carrossel SM 04, que possui abertura de 2,5mm e campo de aproximadamente 11.000 Gauss. O concentrado deste também é adiconado aos demais e o rejeito segue para outros dois carrosséis, os SM´s 02 e 03, com abertura de 2,5mm e campo de 12.000 Gauss. O concentrado destes, juntamente com os concentrados anteriores é encaminhado a hidrociclones e peneiras desaguadoras, que retiram a água excessiva e fecham o processo, gerando uma pilha drenada do produto *Pellet Feed*.

O rejeito da separação magnética passa por hidrociclones. O *underflow* segue para peneiras de alta frequência, sendo o retido nessas peneiras dispostos em uma pilha de rejeitos com baixa umidade. O *overflow* dos hidrociclones vai para um espessador, que adensa esse material para ser alimentado nos filtros prensa. Os rejeitos desaguados pelos filtros prensa formam outra pilha de rejeitos com baixa umidade e a água recuperada é recirculada e reaproveitada na planta de beneficiamento.

3.4 – Cimento Portland

O clínquer Portland é obtido a partir da queima de matérias-primas ricas em CaO, SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3, em forno rotativo a temperaturas próximas de 1500ºC. Esses elementos raramente são encontrados em uma única rocha em proporções adequadas, sendo necessária a utilização de calcários e argilas para a fabricação do clínquer (WORRELL *et al.*, 2001). O processo de fabricação do cimento Portland é mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Processo de fabricação do cimento Portland



Fonte: BATTAGIN, 2011

Após ser extraída da jazida, a matéria-prima passa por uma etapa de britagem e

moagem, com a finalidade de aumentar a área específica e para homogeneizar o material. A moagem é composta por etapa preliminar e de acabamento. Ao fim destas duas etapas, 85 a 90% do material deve ser passante em 200#, o que corresponde a abertura da malha em 0,074mm (PETRUCCI, 1998).

Após a moagem, o material, agora denominado farinha, é encaminhado para a etapa de calcinação. O forno rotativo possui pré-aquecedores, que iniciam a calcinação da farinha. A temperatura no forno varia até temperaturas superiores a 1500ºC (RIBEIRO *et al.*, 2002). As etapas da calcinação de acordo com a temperatura são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Sequência de reações no processo de calcinação

Temperatura	**Processo**
Até 100ºC	Evaporação de água livre
100ºC – 500ºC	Calcinação das argilas
500ºC – 900ºC	Modificações estruturais dos silicatos Decomposição dos carbonatos
900ºC – 1200ºC	Reação de CaO com os sílico-aluminatos
>1280ºC	Formação dos compostos do cimento - clinquerização

Fonte: Ribeiro *et al.* (2002)

A alta temperatura dos fornos rotativos provoca a descarbonatação dos calcários e a destruição da estrutura dos argilominerais. Uma vez liberados, os elementos presentes se recombinam, formando silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Os compostos presentes no clínquer são estáveis somente sob as altas temperaturas na qual foram formados, e sob temperatura ambiente, existem na condição de metaestáveis. Após a passagem pelo forno rotativo, o clínquer sofre rápido resfriamento, para impedir a recristalização dos compostos, garantindo que estes permaneçam na forma amorfa (BATTAGIN, 2011).

3.5 – Pozolanas

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), considera-se material pozolânico qualquer material natural ou artificial, de composição silicosa ou alumino-silicosa, que por si só não apresenta características aglomerantes, mas quando finamente moídos, reage com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, dando origem a compostos com propriedades aglomerantes.

Para Neville (1997), a pozolana deve apresentar-se finamente subdividida, pois somente assim poderá se combinar com o hidróxido de cálcio (liberado pela hidratação do cimento Portland) na presença de água formando silicatos estáveis, que, por sua vez, possuem propriedades cimentantes. A sílica deve estar no estado amorfo, pois a forma cristalina possui reatividade muito pequena.

3.5.1 – Reação pozolânica

A pozolanicidade ainda não foi completamente desvendada, em função de sua enorme complexidade, pois tanto a área superficial específica quanto a composição química estão relacionadas entre si e possuem grande importância. O cimento Portland é formado por quatro componentes básicos: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico, que ao reagirem com água originam compostos hidratados (NEVILLE, 1997).

O C_3A reage nas primeiras horas e continua até os 3 dias de idade, sendo o principal responsável pela pega e endurecimento. O C_3S também inicia sua reação nas primeiras horas, estendendo-se até os 28 dias. É o responsável pelo desenvolvimento da resistência neste período. O C_2S é responsável pelo aumento gradativo da resistência em idades mais avançadas (NEVILLE, 1997).

A reação pozolânica se processa da seguinte forma: durante as reações de hidratação do C_2S e C_3S ocorre a formação do $Ca(OH)_2$ (hidróxido de cálcio). A sílica existente na pozolana reage com o hidróxido de cálcio, formando os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que são produtos de menor basicidade do que os produzidos pela

hidratação dos silicatos de cálcio do cimento e, portanto, são mais estáveis quimicamente. Esta reação, bem como a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência são lentos (SANTOS, 1997).

A NBR 12653 (ABNT, 2014), classifica os materiais pozolânicos em naturais e artificiais. As pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica ácida (teor de sílica acima de 65%), ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. Já as pozolanas artificiais são materiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico, desde que apresentem atividade pozolânica. Esta norma ainda classifica os materiais pozolânicos em três classes, o material ser pertencente à classe N (pozolanas naturais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas), classe C (cinza proveniente da queima de carvão betuminoso) ou classe E (cinza proveniente da queima de carvão sub-betuminoso e qualquer material que difere das classes anteriores). Para ser considerado pozolânico, o material deve estar em conformidade com as características apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Exigências físicas estabelecidas para materiais pozolânicos

Exigências físicas	**Classe de material**		
	N	**C**	**E**
Material retido na peneira 45µm (%máx)	20	20	20
Índice de atividade pozolânica:			
Com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle (%mín)	90	90	90
Com cal aos 7 dias (MPa, mín)	6,0	6,0	6,0
Água requerida (%máx)	115	110	110

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

Tabela 4 - Exigências químicas estabelecidas para materiais pozolânicos

Exigências químicas	**Classe de material**		
	N	**C**	**E**
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (%mín)	70	70	50
SO_3 (%máx)	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade (%máx)	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo (%máx)	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis, em Na_2O (%máx)	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

a) Composição química

A diferença entre os limites mínimos exigidos pelas normas com relação ao três óxidos ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) é variável. Para a Classe N e C, o limite mínimo é de 70% e para Classe E é de 50%. Para MEHTA e MONTEIRO (2014), estes óxidos, quando presentes em estado não cristalino ou pouco cristalino, participam ativamente na reação pozolânica, porém, a exigência mínima da soma destes constituintes assume que eles devem estar sempre presentes na forma reativa, o que é raramente encontrado. A maioria das pozolanas naturais contém grandes quantidades de quartzo e feldspato, que são altamente cristalinos e não reagem com o hidróxido de cálcio.

b) Presença de material carbonoso

Não existem indícios para afirmar que a presença de material carbonoso afeta a reatividade de uma pozolana. Entretanto, sua presença pode causar prejuízos ao uso deste material, aumentando a demanda de água, sendo necessário o uso de aditivos redutores de água (plastificantes). Sua determinação normalmente é feita indiretamente através de ensaios de perda ao fogo, que limita em 10% o valor máximo de perda ao fogo para a Classe N e 6% para as Classes C e E (SANTOS, 1997).

c) Presença de álcalis e sulfatos

A expansão e a ruptura do concreto, muitas vezes, estão relacionadas com a presença de sulfatos e álcalis, presentes nos materiais constituintes, entre eles, as adições

minerais. A norma restringe a quantidade de álcalis em 1,5% e de sulfatos em 4% para a Classe N e 5% para as Classes C e E (MALHOTRA e MEHTA, 1996 *apud* WEBER, 2001).

d) Umidade

Por definição, uma pozolana é um material que isoladamente, em presença de água, não reage. Os limites impostos pelas normas, referentes à umidade do material pozolânico, são necessários apenas para a dosagem do concreto, no controle da relação água/aglomerante e não devem servir como um critério para sua avaliação (GAVA, 1999).

e) Finura

A finura da pozolana é a característica física mais importante a ser levada em consideração durante sua avaliação, pois, para que a mesma desenvolva compostos cimentantes, deverá apresentar uma finura maior que as partículas de cimento. A presença de partículas maiores que 45µm influi na quantidade de água na argamassa e, por conseguinte, a determinação do resíduo na peneira 45µm indica a quantidade de partículas maiores, que além de não contribuírem em nada para o desenvolvimento da resistência, podem concentrar partículas de material carbonoso (WEBER, 2001).

f) Índice de atividade pozolânica

A maioria das normas de especificação fixa um valor mínimo para uma propriedade conhecida como índice de atividade pozolânica. Este índice é obtido experimentalmente, através de diferentes tipos de ensaio. Entretanto, não existe um consenso entre as diferentes normas sobre qual é a forma mais adequada de avaliar tal propriedade. A medida do índice de atividade pozolânica de uma adição mineral com cimento Portland é, em geral, realizada através de ensaio acelerado em argamassas, onde parte do cimento Portland é substituído pela pozolana, utilizando-se cura com temperatura elevada e controlada (MALHOTRA e MEHTA, 1996 *apud* WEBER, 2001).

Dentre as pozolanas naturais, as argilas mais utilizadas são aquelas ricas em

caulinitas. Este mineral sofre transformações químicas após ser submetido a tratamentos térmicos, com a formação de metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$), que é o produto resultante da calcinação da caulinita em temperaturas controladas (OLIVEIRA e BARBOSA, 2006). Com relação a pureza das argilas, esta deve apresentar entre 70 e 90% de caulinita para que tenha boa atividade pozolânica (MEDINA, 2011).

Como pozolanas artificiais, são usados materiais que são resíduos de outras atividades industriais. Como exemplo, cita-se a cinza volante, cinza de casca de arroz e a sílica ativa.

A cinza volante é o resíduo gerado pela queima de carvão pulverizado em usinas termoelétricas. São gerados dois tipos de cinzas no processo de queima: as cinzas pesadas e as cinzas volantes. As cinzas pesadas possuem textura grosseira e caem no fundo da fornalha, enquanto as cinzas volantes possuem textura mais fina, são arrastadas pelos gases da combustão, e são coletadas mecanicamente (MOLIN, 2011). Gobbo (2009) caracterizou a cinza volante de fontes brasileiras através de difração de raios-x utilizando a técnica de Rietveld, encontrando quantidades de sílica amorfa entre 50 e 70%.

As cascas de arroz são produzidas após o beneficiamento do arroz, e são geradas em grandes quantidades, muitas vezes ocasionando acúmulo nos moinhos e gerando transtornos no processo. A cinza de casca de arroz apresenta quantidade considerável de sílica reativa, acima de 80%, sob forma menos cristalina, e necessita passar por processo de moagem para desenvolver atividade pozolânica (MEDEIROS, 2015; MEHTA e MONTEIRO, 2014)

A sílica ativa é um subproduto da fabricação do ferro-silício. O silício e o ferro-silício são produzidos em fornos elétricos do tipo arco-voltaico, operando em temperaturas acima de 2000ºC. Durante a redução do quartzo a silício, há a formação de óxido de silício gasoso, que é transportado para a parte superior do forno, onde a temperatura é mais baixa. Nessa região, o SiO_2 sofre oxidação ao entrar em contato com o ar, formando dióxido de silício, na forma de partículas esféricas de granulometria extremamente fina (MEHTA, 1984). As partículas de sílica ativa são em média 100

vezes menores que as partículas do cimento Portland, apresentando área superficial média de 20.000 m²/kg (MOLIN, 2011). É composta por mais de 96% de sílica amorfa, sendo desta forma altamente reativa (HOT *et al.*, 2015).

3.6 – Estudos envolvendo resíduos da mineração de ferro

Toffolo *et al.* (2014) estudaram a viabilidade do uso do rejeito de minério de ferro para substituição de agregado miúdo para fabricação de bloco de concreto para pavimentação. O agregado miúdo foi substituído pelo rejeito nas proporções de 10, 50 e 80%. Os blocos foram caracterizados para determinação de absorção de água, porosidade e resistência à compressão. Por ter granulometria fina, as partículas do rejeito preenchem os poros do concreto e como resultado, os blocos que tiveram a substituição tiveram índice de porosidade e de absorção de água menores. Quanto à resistência mecânica, os autores observaram que o único traço que apresentou resistência inferior aos 50MPa exigidos pela norma para aplicação em vias de alto tráfego foi o de 80%, mas que poderia ter aplicação em vias de tráfego menos intenso (35MPa).

Aristimunho e Bertocini (2012) avaliaram a utilização do rejeito de minério de ferro como material adicional, substituição do agregado miúdo e substituição do cimento em argamassas. Em uma das composições, o rejeito foi adicionado à argamassa em 4, 6, 8 e 20%. Os autores relataram melhorias na resistência mecânica nas composições de 6 e 8%, devido ao adensamento do rejeito. A substituição do agregado miúdo foi feita em 20, 60 e 100%, sendo que em todas as composições as argamassas mostraram maior resistência mecânica em comparação com a argamassa de referência. Os autores também avaliaram a porosidade desta composição, e observaram que o aumento da substituição tende a aumentar a porosidade, diferentemente do que foi observado por Torffolo *et al.* (2014). Por fim, a substituição do cimento pelo rejeito apresentou resultados negativos, devido à queda de resistência pelo aumento da substituição. O melhor resultado obtido foi com a substituição de 10%, alcançando 17MPa aos 90 dias.

Souza *et al.* (2008) realizaram estudos sobre a influência da adição de rejeito de minério de ferro em massa argilosa para fabricação de cerâmica. O rejeito foi adicionado nas proporções de 5, 10, 20 e 30% em peso na massa argilosa, sendo posteriormente queimada nas temperaturas de 700, 900 e 1100ºC. Os autores observaram que em adições acima de 10% em peso, a hematita e o quartzo presentes no rejeito dificultam o processo de sinterização, pois são materiais refratários, o que acaba prejudicando a difusão das partículas, gerando maior quantidade de poros. Em incorporações de até 10%, as partículas de rejeito atuam como material de preenchimento, reduzindo a porosidade e o tamanho dos poros, tendo efeito benéfico na resistência mecânica da peça.

Em pesquisa similar, Chaves (2009) avaliou a incorporação do rejeito de minério de ferro em duas matrizes argilosas, provenientes do estado do Rio Grande do Norte. Na caracterização das massas argilosas, a massa A foi classificada como altamente plástica, enquanto a amostra B foi classificada como medianamente plástica. O rejeito foi adicionado às massas nas proporções de 5, 10, 15, 20, 25 e 30% em peso, sendo os corpos de prova queimados nas temperaturas de 850, 950 e 1050ºC. Nos corpos de prova confeccionados com a argila A, o autor observou redução na retração linear na faixa de adição de 5 e 10% de rejeito queimadas na temperatura de 1050ºC, assim como redução da porosidade para essa faixa de temperatura. A tensão de ruptura à flexão aumentou em adições de até 10%, sendo os melhores resultados observados nos corpos de prova com adição de 5%, apresentando tensão de ruptura 65% maior que os corpos de prova de referência. Os resultados para a massa argilosa B também foram satisfatórios, mas não foram tão pronunciados quanto a massa argilosa A. Segundo o autor, isto ocorreu devido à interferência positiva que a plasticidade da massa A teve nos corpos de prova durante o processo de sinterização, embora as duas apresentassem composição química semelhante.

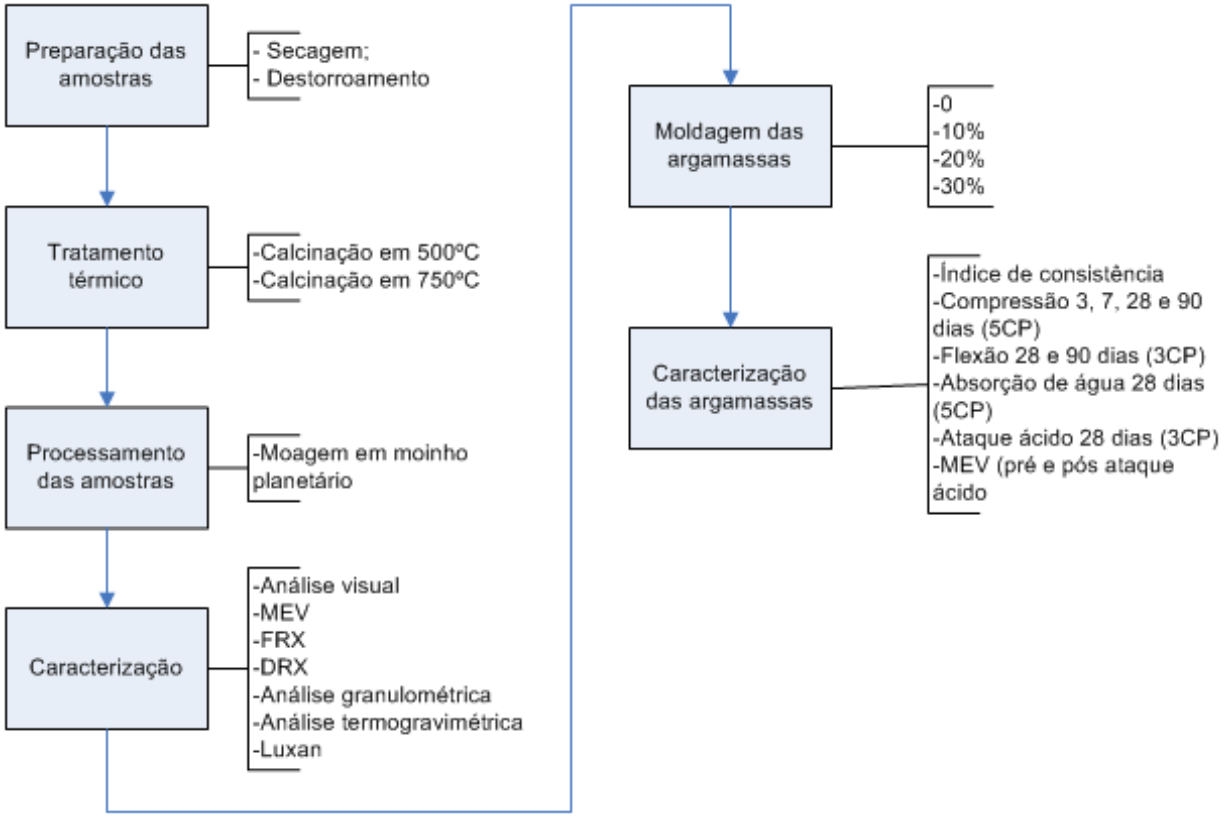
Silva (2014) analisou a possibilidade de uso de rejeito de minério de ferro para substituição de agregados na fabricação de blocos intertravados e na adição em cerâmicas. O rejeito utilizado vem de dois processos distintos do beneficiamento do minério, sendo um rejeito proveniente da flotação e outro da separação magnética, sendo esta separada em duas faixas granulométricas. Na fabricação dos blocos,

foram usados os dois rejeitos da concentração magnética, em substituição dos agregados fino e grosso. Os resultados mostraram que a incorporação do rejeito na fabricação dos blocos teve resultado positivo quando a resistência à compressão, sendo que todas as composições com rejeito mostraram resistência superior aos blocos sem adição. Na fabricação das cerâmicas, todos os rejeitos foram utilizados, sendo adicionados à massa em 5% em peso. A adição do rejeito à cerâmica contribuiu para a redução da absorção de água, apresentando resultados na faixa de 25,5%, contra 31% apresentado pelos blocos de referência. A resistência à flexão também foi beneficiada, sendo 6,53MPa a faixa de tensão obtida para as cerâmicas com rejeito, enquanto a cerâmica de referência apresentou tensão de 5,08MPa.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, o rejeito de minério de ferro foi processado por moagem e tratamento térmico, sendo posteriormente caracterizado, para conhecimento de suas características químicas, mineralógicas e morfológicas. Após a caracterização, foi realizada a dosagem das argamassas. Os corpos de prova foram preparados para caracterização física e química. O fluxograma do trabalho é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma das atividades



Fonte: Autoria própria

4.1 – Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa estão listados na Tabela 5, com os respectivos fornecedores e origem.

Tabela 5 - Materiais utilizados

Material	Fornecedor	Origem
Rejeito de minério de ferro	Vallourec Mineração	Brumadinho – MG
Cimento Portland CP V	Brennand Cimentos	Sete Lagoas – MG
Areia	Instituto de Pesquisas Tecnológicas	São Paulo – SP
Água	COPASA-MG	Belo Horizonte – MG
Hidróxido de cálcio (P.A.)	ECIBRA	Santo Amaro – SP
Ácido sulfúrico (P.A.)	NEON	Suzano – SP

Fonte: Autoria própria

4.1.1 – Rejeito de minério de ferro

Foram utilizadas três amostras de rejeito de minério de ferro na realização deste trabalho. O primeiro deles, *in natura*, foi coletado na mineradora Vallourec, diretamente na pilha de rejeitos. O material coletado foi o rejeito proveniente dos espessadores, constituindo um material mais fino do que o rejeito proveniente das peneiras de alta frequência. Como o rejeito coletado não é disposto em barragem, este apresenta certa uniformidade na composição mineralógica. Desta forma, a coleta da amostra foi realizada de forma aleatória, em vários pontos da pilha. As outras amostras de rejeito foram recebidas já na forma calcinada, sendo o processo de calcinação realizado em forno rotativo, em temperaturas de 500 e 750°C. As amostras de rejeito foram condicionadas em bombonas plásticas com capacidade de 50L, sendo transportados até o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais, no Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG. O ponto de coleta do rejeito é mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Ponto de coleta do rejeito de minério de ferro



Fonte: Autoria própria

4.1.2 – Cimento Portland

O cimento Portland utilizado nos experimentos foi o Cimento Nacional, tipo CPV-ARI, fornecido pela Brennand Cimentos, e suas propriedades são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades físicas do cimento Portland

Ensaios	**Resultados**
Área específica Blaine (cm²/g)	4651
Massa específica (g/cm³)	3,04
Índice de finura (%)	0,08
Resíduo na peneira #325 (%)	0,81
Água de consistência normal (%)	29,4
Início de pega (min)	167
Fim de pega (min)	225
Expansibilidade à quente (mm)	0,00

Fonte: Brennand Cimentos, 2016

4.1.3 – Areia

A areia normal utilizada no trabalho foi fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, no Estado de São Paulo. Foram utilizadas areias em quatro faixas

granulométricas diferentes, sendo elas de material retido nas peneiras nº 16 (1,19mm), nº 30 (0,59mm), nº 50 (0,297mm) e nº 100 (0,169mm).

4.1.4 – Água

A água utilizada foi fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais. Todos os experimentos foram realizados nos laboratórios dos Departamentos de Engenharia de Transportes e Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

4.1.5 – Hidróxido de cálcio

O hidróxido de cálcio foi utilizado na preparação de solução saturada para a cura das argamassas. A massa molar fornecida pelo fabricante é 74,09 g/mol e a concentração mínima de $Ca(OH)_2$ é de 93%.

4.1.6 – Ácido sulfúrico

O ácido sulfúrico foi utilizado na preparação de solução para o ensaio de ataque ácido nos corpos de prova. O reagente possui densidade de 1,83g/cm³ e pureza de 98%, dados fornecidos pelo fabricante.

4.2 – Métodos

O estudo foi dividido em quatro etapas. Na primeira etapa, foi realizada a preparação da amostra de rejeito de minério de ferro, incluindo secagem, tratamento térmico e moagem. Na segunda etapa foi realizada a caracterização química, física e morfológica do rejeito. A terceira etapa incluiu a dosagem das argamassas e a moldagem dos corpos de prova. Na quarta etapa foram realizados os ensaios físico-químicos nas pastas e nos corpos de prova das argamassas com as diferentes composições.

4.2.1 – Preparação e processamento do rejeito de minério de ferro

O rejeito coletado apresentava umidade de aproximadamente 14%, pois o processo de beneficiamento do minério é realizado a úmido. O material foi seco em estufa, em aproximadamente 100ºC, durante 24 horas. Devido à predominância de partículas finas, houve a formação de torrões após a secagem do rejeito. Foi necessário que os torrões fossem desfeitos manualmente com auxílio de almofariz e pistilo antes da etapa de moagem.

Para a utilização do rejeito de minério de ferro material cimentício suplementar, foi necessário reduzir a granulometria do material, para aumentar sua área superficial e consequentemente, aumentar sua reatividade. A técnica de moagem em moinho de bolas foi utilizada para a redução da granulometria do rejeito. Para a determinação do tempo de moagem apropriado foi realizado um estudo prévio de moagem, no qual o rejeito foi moído em tempos de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos.

A moagem foi realizada em moinho planetário de alto desempenho, da marca FRITSCH, modelo Pulverisette 5. O moinho conta com quatro recipientes de moagem, compostos de óxido de zircônio, sendo que cada recipiente tem capacidade de 500ml. Foram utilizadas 18 esferas de moagem, de 20mm de diâmetro, também compostas de óxido de zircônio. A velocidade da moagem foi ajustada em 300RPM. O moinho e seus componentes são mostrados na Figura 12.

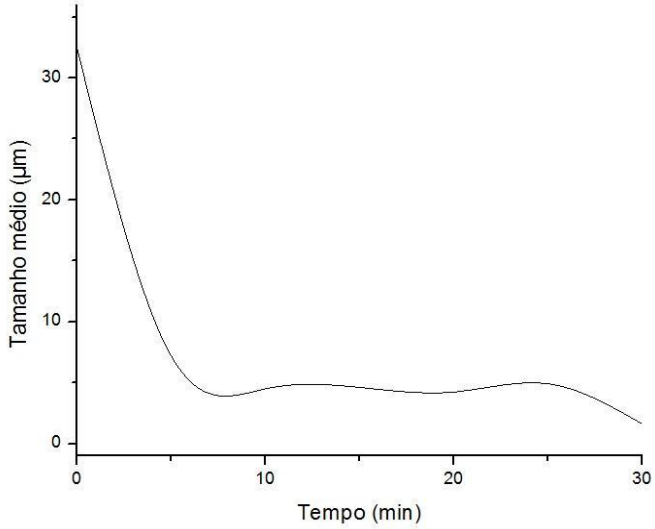
Figura 122 - Moinho planetário e componentes



Fonte: Autoria própria

As amostras de cada tempo de moagem foram analisadas em um granulômetro a laser Cilas 1090 *Laser Particle Size Analyser*, no Laboratório de Caracterização de Materiais, no CEFET-MG. Os resultados dos tamanhos médios de partícula (obtidas pelo método de aproximação de *Fraunhofer*) em função do tempo foram plotados no gráfico apresentado na Figura 13.

Figura 133 - Relação entre tempo de moagem e tamanho de partícula



Fonte: Autoria própria

Observa-se que a partir do tempo de 7 minutos o valor do diâmetro médio das partículas sofre variações pequenas, tendo uma diminuição significativa apenas no tempo de 30 minutos. Por questões de gasto energético, o tempo escolhido para a moagem do rejeito foi de 10 minutos.

O rejeito calcinado a 500ºC foi submetido a calcinação em forno rotativo na granulometria em que foi coletado. Dessa forma, foi necessário realizar a moagem deste rejeito nos mesmos parâmetros escolhidos para o rejeito *in natura,* para adequação granulométrica*.* O rejeito calcinado a 750°C foi submetido a moagem antes do processo de calcinação. Como o rejeito já havia sido previamente moído, por questões de gasto energético, optou-se por não se realizar remoagem deste rejeito.

4.2.2 – Caracterização do rejeito de minério de ferro

Foram realizados nas amostras de rejeito *in natura* e calcinados os ensaios de análise visual, microscopia eletrônica de varredura, florescência de raios-x, difração de raios-x, granulometria a laser, análise termogravimétrica, e Luxan.

4.2.2.1 – Análise visual

O ensaio de análise visual foi realizado no material para caracterização da macroestrutura e coloração das amostras. Foi feita a observação das amostras de rejeito de minério de ferro *in natura* e calcinadas.

4.2.2.2 – Microscopia eletrônica de varredura

As amostras de rejeito *in natura* e calcinadas foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura para observação da morfologia das partículas, através de imagens de alta resolução. A análise foi realizada no microscópio de baixo vácuo da marca Hitachi, modelo TM3000, no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais, no CEFET-MG. As imagens foram obtidas com aceleração de elétrons de 15kV. O microscópio utilizado no ensaio é mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: Autoria própria

4.2.2.3 – Fluorescência de raios-X

O ensaio de fluorescência de raios-X foi realizado como objetivo de determinar qualitativamente e semi-quantitativamente a composição química do rejeito de minério de ferro *in natura*. O ensaio de fluorescência foi realizado pela empresa SGS Geosol. A amostra de rejeito utilizada para a análise foi a de rejeito *in natura.*

4.2.2.4 – Difração de raios-x

A mineralogia presente nos rejeitos de minério de ferro foi verificada através do ensaio de difração de raios-X. As fases cristalinas foram identificadas através da comparação entre os picos gerados pela amostra e picos de difrações padrão. O equipamento utilizado no ensaio foi o difratômetro da marca SHIMADZU, modelo XRD-7000, presente no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Difratômetro de raios X



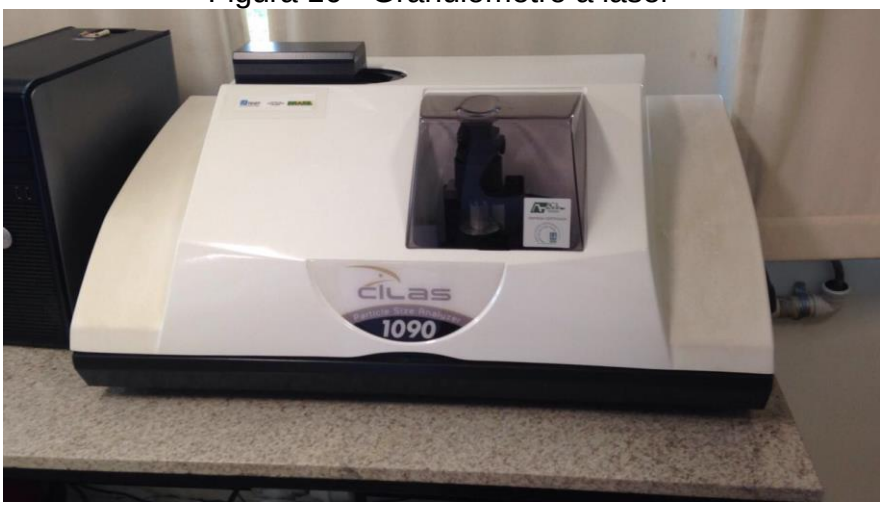
Fonte: Autoria própria

Foram analisadas a amostra de rejeito *in natura* e as amostras calcinadas, para verificação de mudanças mineralógicas devido à calcinação. O equipamento operou com radiação k-alfa de Cu (40kV/30mA), 2θ de 10º a 80º, passo de 2º/min. Para analisar os difratrogramas gerados nos ensaios foi utilizada a versão demonstrativa do software Match! e o banco de dados Crystallography Open Database Inorganic, revisão 173445 de 04 de janeiro de 2016 (COD-Inorg REV173445 2016.01.04).

4.2.2.5 – Análise granulométrica

A granulometria das amostras foi analisada pelo granulômetro a laser Cilas 1090 Laser Particle Size Analyzer, mostrado na Figura 16, no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais, no CEFET-MG. A amostra foi previamente tratada por ultrasom por 60 segundos, para dispersão das partículas, e o ensaio foi realizado com obscuração de 15%.

Figura 16 - Granulômetro a laser



Fonte: Autoria própria

4.2.2.6 – Análise termogravimétrica

O ensaio de termogravimetria foi realizado no Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Química do CEFET-MG, e tem propósito medir a variação de massa sofrida pela amostra em função da temperatura, identificando perdas de água superficial e possíveis reações de redução, oxidação ou desidroxilação sofridas por ela. O ensaio foi realizado no analisador térmico da marca SHIMADZU DTA – 60H, mostrado na Figura 17, utilizando cadinho de alumínio, fluxo de gás nitrogênio a 100ml/min, de 24ºC até 1100ºC, a uma taxa de incremento de 5ºC/min. Para a realização do ensaio, foi utilizada mostra de 5mg de amostra dos três tipos de rejeito.

Figura 17 - Analisador térmico diferencial e termogravimétrico



Fonte: Autoria própria

4.2.3.7 – Luxan

No estudo de materiais pozolânicos, são utilizados ensaios que medem a reatividade química da amostra. O método desenvolvido por Luxan *et al.* (1989) avalia a reatividade do material através da variação de condutividade. Os materiais têm sua atividade pozolânica avaliada de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade

Pozolanicicade do material	**Condutividade (mS/cm)**
Não pozolânico	< 0,4
Pozolanicidade variável	0,4 a 1,2
Boa pozolanicidade	> 1,2

Fonte: LUXAN *et al.*, 1989

Para a realização do ensaio foram utilizados 200ml de solução saturada de hidróxido de cálcio a uma temperatura de 40ºC, conforme mostrado na Figura 18. A condutividade da solução foi medida nestas condições com um condutivímetro da marca Akrom, modelo KR30. A seguir, foi adicionada 5g da amostra de rejeito, mantendo a mistura em agitação por 120 segundos, sendo a condutividade

novamente medida após este tempo. Finalmente, foi calculada a variação de condutividade, obtida em mS/cm, e comparada com os valores expostos na Tabela 7. Foi realizada também a medida da variação de condutividade da solução após o tempo de agitação sem a adição do rejeito, para verificação da influência da reação entre a solução e o CO_2 atmosférico.

Figura 18 - Ensaio Luxan

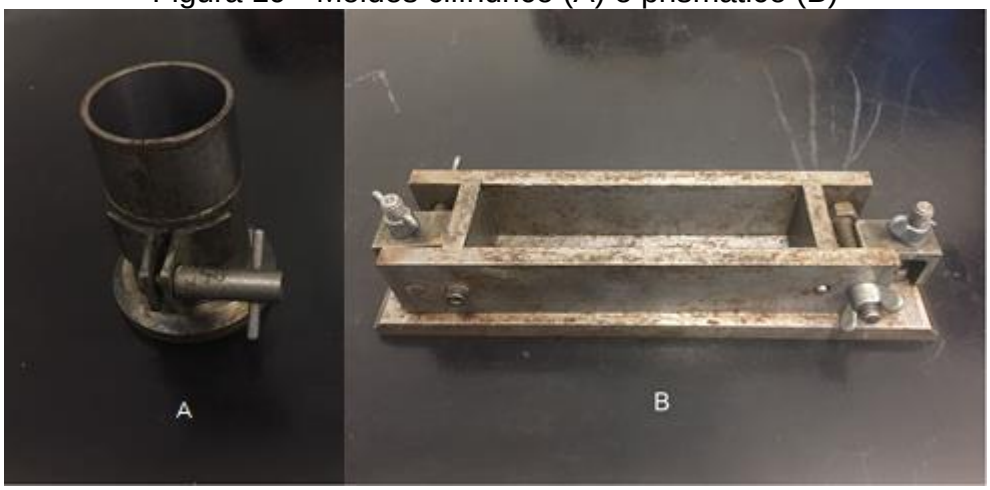


Fonte: Autoria própria

4.2.3 – Moldagem das argamassas

Após as análises dos resultados dos ensaios de caracterização, foi dado início à dosagem e confecção dos corpos de prova. Para a moldagem dos corpos de prova de argamassa foram utilizados moldes cilíndricos de aço, com diâmetro de 50mm e altura de 100mm e formas de aço prismáticas, com 160mm de comprimento e 40mm de largura/altura. A Figura 19 ilustra os três tipos de formas utilizados no trabalho.

Figura 19 - Moldes cilíndrico (A) e prismático (B)



Fonte: Autoria própria

As argamassas foram preparadas utilizando cimento Portland CP V-ARI, areia normal, rejeito de minério de ferro e água. Foram utilizadas quatro frações granulométricas diferentes de areia (nº 16, 30, 50 e 100), em quantidades iguais. Para a argamassa referência, a razão cimento/areia utilizada foi 1:3 em peso, e a relação água/cimento foi de 0,48. Para a preparação das outras composições, o cimento foi substituído pelo rejeito nas proporções de 10, 20 e 30% em peso, mantendo-se a relação (cimento+rejeito)/areia em 1:3 e água/(cimento+rejeito) em 0,48. A Tabela 8 mostra as quantidades de material utilizadas em cada composição.

Tabela 8 - Composição das argamassas

Argamassas	**Materiais (g)**			**Traço**
	Cimento Portland	**Rejeito**	**Areia**	
Referência	624,0	0	1872,0	1:3:0,48
10%	561,6	62,4	1872,0	1:3:0,48
20%	499,2	124,7	1872,0	1:3:0,48
30%	436,8	187,2	1872,0	1:3:0,48

Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova foram moldados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997), sendo desmoldados com 24h e permanecendo imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio até as idades dos ensaios. Para todas as composições também foi avaliado o índice de consistência, conforme a NBR 7215 (ABNT, 1997). A relação entre os

ensaios realizados, idades do ensaio, tipo e quantidade de corpos de prova estão listados na Tabela 9.

Tabela 9 - Relação entre corpos de prova e ensaios realizados

Ensaio	**Idade**				**Tipo de CP**	**Quantidade de CP por composição por idade**
	3	**7**	**28**	**91**		
Compressão	X	X	X	X	Cilíndrico	5
Resistência à flexão			X	X	Prismático	3
Absorção de água			X		Cilíndrico	3
Ataque ácido			X		Cilíndrico	3

Fonte: Autoria própria

4.2.4 – Caracterização das argamassas e dos corpos de prova

Para as argamassas no estado fresco, foi realizado ensaio de índice de consistência. Já para as argamassas no estado endurecido, foram realizados os ensaios, resistência à compressão, resistência à flexão, absorção de água e ataque químico e microscopia eletrônica de varredura.

4.2.4.1 – Índice de consistência

O ensaio tem como objetivo avaliar a consistência e plasticidade adequadas ao processo de execução, além da retenção de água apresentada pela argamassa no estado fresco. O ensaio, ilustrado na Figura 20, foi realizado de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997).

Figura 20 - Ensaio de índice de consistência

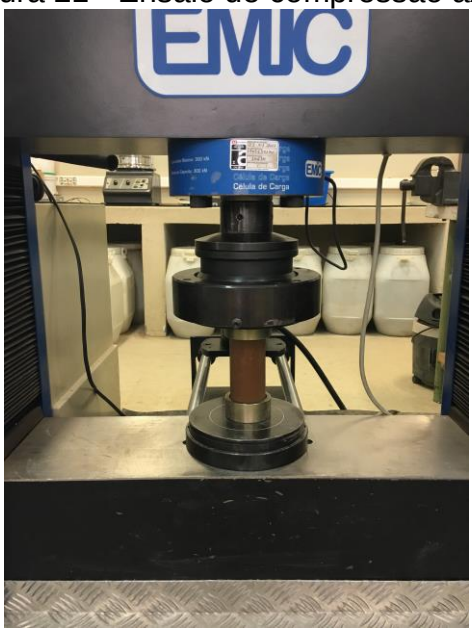


Fonte: Autoria própria

4.2.4.2 – Resistência à compressão

A resistência à compressão foi obtida pelo rompimento dos corpos de prova em idades de 3, 7, 28 e 91 dias. O ensaio foi realizado no Equipamento Universal da marca EMIC, calibrado para operar com taxa de incremento de tensão de 0,25MPa/s, segundo a NBR 7215 (ABNT, 1997). A montagem do equipamento é ilustrada na Figura 21. Para minimizar a irregularidade da superfície dos corpos de prova, foram utilizados capeadores metálicos com neoprene. Os resultados do ensaio foram obtidos pelos *softwares* TESC e Vmac.

Figura 21 - Ensaio de compressão axial

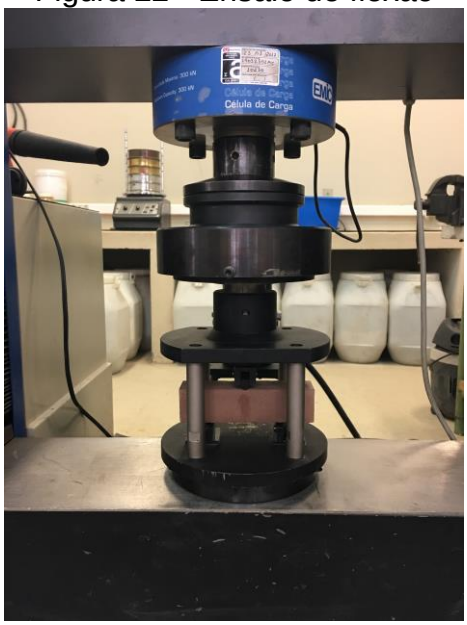


Fonte: Autoria própria

4.2.4.3 – Resistência à flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado no Equipamento Universal de marca EMIC, seguindo os parâmetros estabelecidos na NBR 13279 (ABNT, 2005). Durante o ensaio, o corpo de prova é posicionado sobre elementos de apoio, sendo a carga aplicada no seu terço médio, conforme pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - Ensaio de flexão



Fonte: Autoria própria

4.2.4.4 – Absorção de água

Para a realização do ensaio de absorção de água foi utilizada como referência a NBR 9778 (ABNT, 1987). Durante o ensaio utilizou-se balança hidrostática, estufa, cesto de arame e tanque de água. O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais, no CEFET-MG. A estrutura montada para a realização deste ensaio é mostrada na Figura 23.

Figura 23 - Ensaio de absorção de água



Fonte: Autoria própria

4.2.4.5 – Ataque ácido

Algumas substâncias presentes na água que penetra nos poros das argamassas e concretos são prejudiciais à sua durabilidade, pois reagem com compostos presentes na matriz, gerando produtos expansivos, provocando trincas e fissuras. O ensaio de ataque químico foi realizado de acordo com a metodologia adotada por Almeida (2009). Os corpos de prova foram imersos em solução de ácido sulfúrico a 5%, durante um período de sete dias. O volume de solução utilizado foi de 1300ml, suficiente para cobrir os corpos de prova, sendo imersos 3 corpos de prova cilíndricos do mesmo traço em cada recipiente. Após este tempo, os corpos de prova foram lavados e escovados para simulação do efeito de desgaste mecânico, sendo secos em estufa e posteriormente analisados visualmente e pesados para verificação da perda de massa.

4.2.4.6 – Microscopia eletrônica de varredura

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi utilizado para observação da microestrutura das argamassas nas diferentes composições, em idade de 28 dias.

Para a realização do ensaio foram utilizados fragmentos gerados durante o rompimento dos corpos de prova, sendo observada a porção interna da argamassa. Isto foi feito para garantir que a região observada ilustrasse da melhor forma possível a real interação entre os componentes da argamassa. No caso dos corpos de prova que sofreram ataque ácido, a região observada foi a superfície do corpo de prova, pelo fato de que a degradação dos mesmos foi somente superficial.

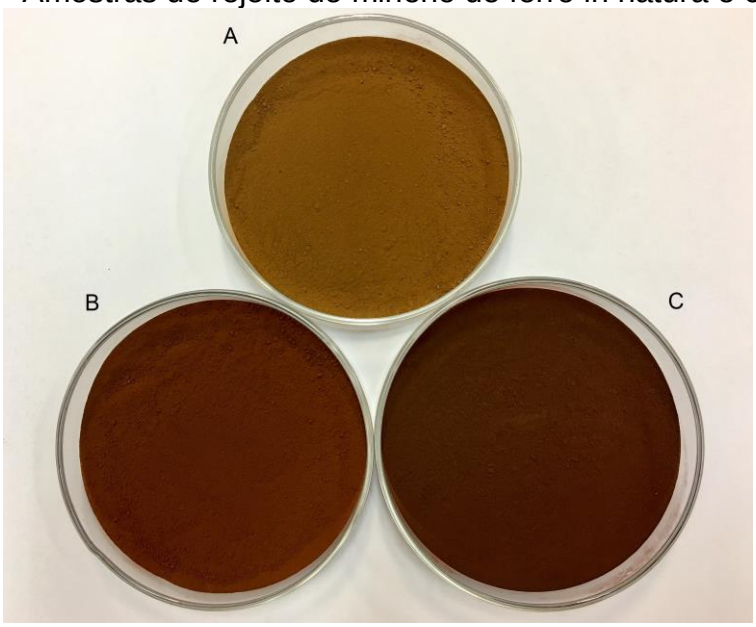
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – Caracterização química e mineralógica do rejeito de minério de ferro

5.1.1 – Análise visual

As amostras de rejeito de minério de ferro moídas e calcinadas que foram utilizadas nesta pesquisa são apresentadas na Figura 24.

Figura 24 - Amostras de rejeito de minério de ferro in natura e calcinadas



Fonte: Autoria própria

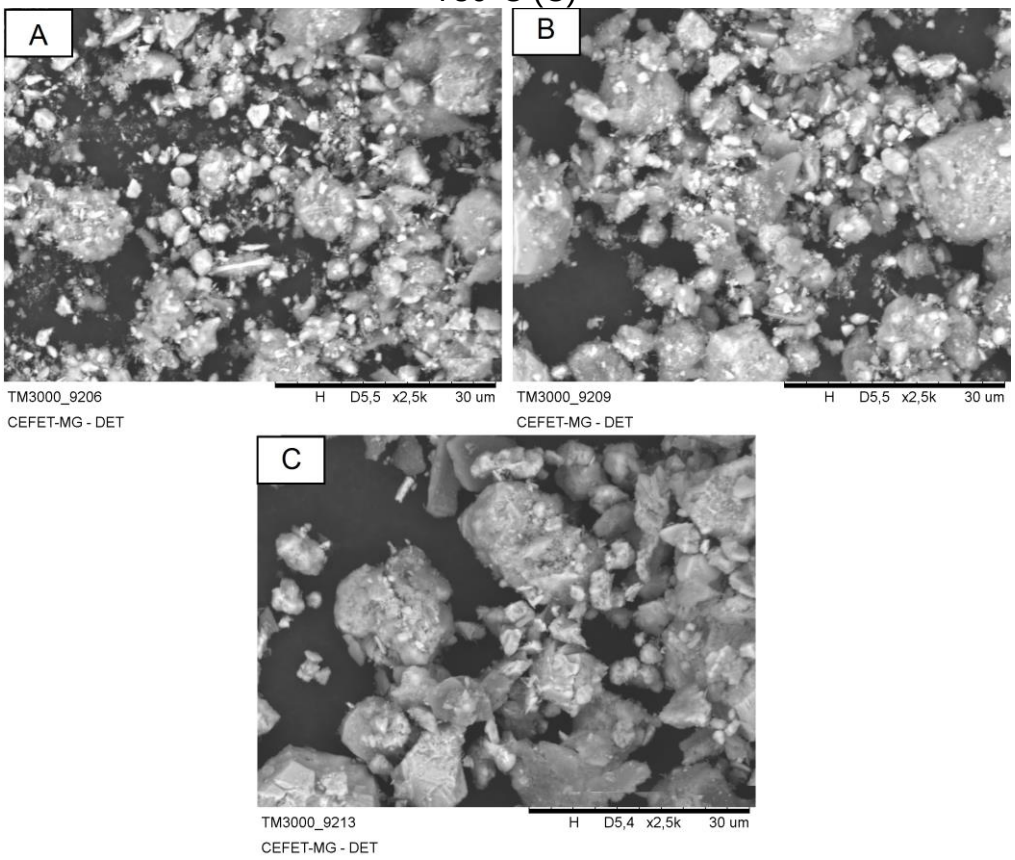
O rejeito no estado *in natura* (A) apresenta coloração amarelada, enquanto as amostras calcinadas a 500 e 750°C, (B) e (C) respectivamente, apresentam coloração avermelhada. A mudança na coloração das amostras indica mudanças mineralógicas sofridas durante o processo de calcinação. Visualmente, as amostras apresentam distribuição granulométrica fina e homogênea.

5.1.2 – Microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 25 são mostradas as micrografias obtidas das amostras de rejeito *in natura*

(A) e calcinado a 500 (B) e 750ºC (C).

Figura 25 - Micrografia das amostras de rejeito in natura(A) e calcinadas a 500 (B) e 750°C (C)



Fonte: Autoria própria

Nota-se a presença de partículas compactas, sem estruturas lamelares, o que pode indicar baixa área superficial específica. É possível observar a presença de material muito fino, que está aderido às partículas maiores. Em termos de morfologia, não se notam grandes mudanças sofridas pelas amostras com o processo de calcinação.

5.1.3 – Fluorescência de raios-x

Na Tabela 10 são apresentadas as composições químicas semiquantitativas do rejeito de minério de ferro.

Tabela 10 - Composição química (semi-quantitativa) da amostra de rejeito

Constituinte	**Massa (%)**
Óxidos de ferro (Fe_2O_3, FeOOH)	66,9
SiO_2	23,0
Al_2O_3	3,2
Mn	0,6
P	0,2
Perda ao fogo	6,3

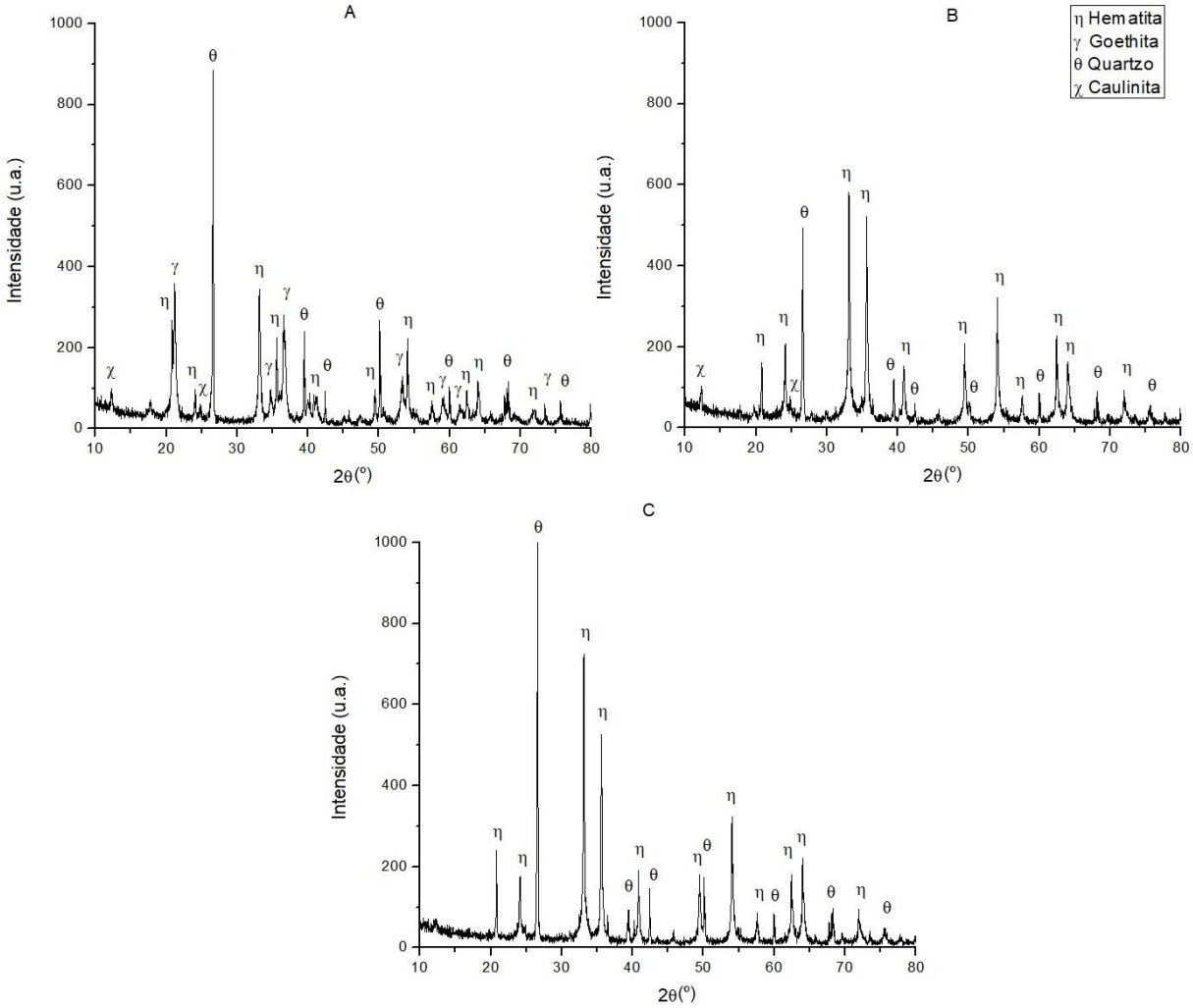
Fonte: Autoria própria

Observa-se pelos resultados que a amostra é constituída quase em sua totalidade por óxidos e hidróxidos de ferro, SiO_2 e Al_2O_3. A composição do rejeito atende a exigência da NBR 12653 (ABNT, 2014), que determina que o somatório das quantidades de Fe_2O_3, SiO_2 e Al_2O_3 deve ser superior a 70%, pois este material se encaixa na Classe N de materiais pozolânicos (argilas calcinadas).

5.1.4 – Difração de raios-x

Os difratogramas das amostras de rejeito de minério de ferro são mostrados na Figura 26.

Figura 26 - Difratogramas das amostras de rejeito de minério de ferro in natura (A) e calcinadas (B) e (C)



Fonte: Autoria própria

No rejeito de minério de ferro *in natura* mostrado na figura 26A, foram identificados picos referentes a quartzo, hematita, goethita e caulinita. No difratograma da Figura 26B, referente ao rejeito calcinado na temperatura de 500ºC, não é possível observar picos de goethita. Conforme mostrado no resultado da análise termogravimétrica (que será discutido mais a frente) realizada no rejeito *in natura*, a transformação da goethita em hematita ocorre entre 200 e 300ºC (MAGALHÃES, 2008). Esta alteração mineralógica é a responsável pela tonalidade avermelhada adquirida pelo rejeito após a calcinação.

Ainda na Figura 26B, é possível observar que os picos de caulinita ainda estão presentes no difratograma da amostra. A caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH_4)$) é um dos

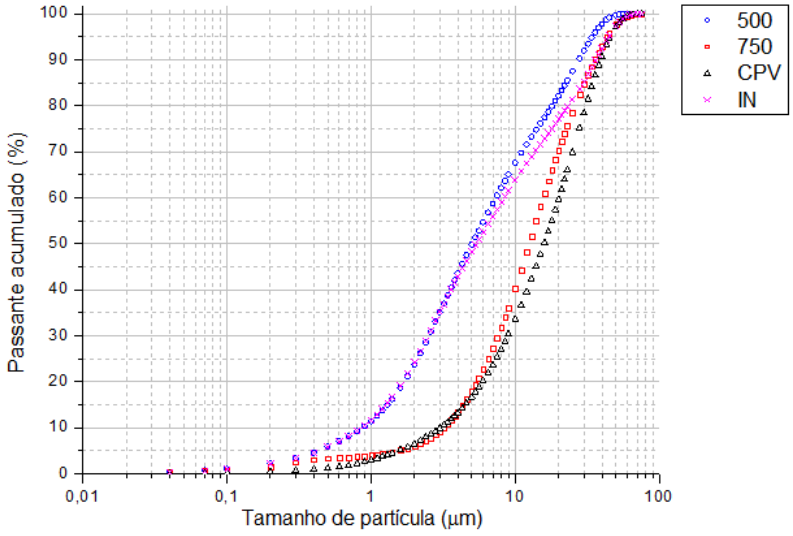
argilominerais mais utilizados na produção de pozolanas, através da sua transformação em metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$) durante a calcinação. As propriedades pozolânicas da caulinita são alcançadas a cerca de 500ºC (CARNEIRO *et al.*, 2003), porém a temperatura ótima varia entre 700 e 900ºC (OLIVEIRA e BARBOSA, 2006). No difratograma do rejeito calcinado a 500ºC, ainda são visíveis picos referentes à caulinita, indicando que sua transformação em metacaulinita pode ter se iniciado, mas que não foi concluída em toda caulinita presente na amostra.

A Figura 26C ilustra o difratograma da amostra de rejeito calcinada em 750ºC. Nesta amostra, os picos de caulinita não são mais visíveis, indicando que a totalidade deste mineral foi transformada em metacaulinita. A perda da hidroxila durante a calcinação gera um desarranjo na estrutura deste argilomineral, formando um produto amorfo, razão pela qual a metacaulinita não pode ser identificada no difratograma.

5.1.5 – Análise granulométrica

A Figura 27 ilustra o resultado da análise granulométrica realizada nas amostras de rejeito, *in natura* e calcinadas, e no cimento Portland.

Figura 27 - Curvas granulométricas dos rejeitos e do cimento Portland



Fonte: Autoria própria

Observando o resultado do ensaio de granulometria a laser, verifica-se que todas as

amostras de rejeito de minério de ferro apresentam granulometria inferior à do cimento Portland. As curvas das amostras de rejeito *in natura* e calcinada a 500º indicam que estes dois materiais apresentam distribuição granulométrica similar.

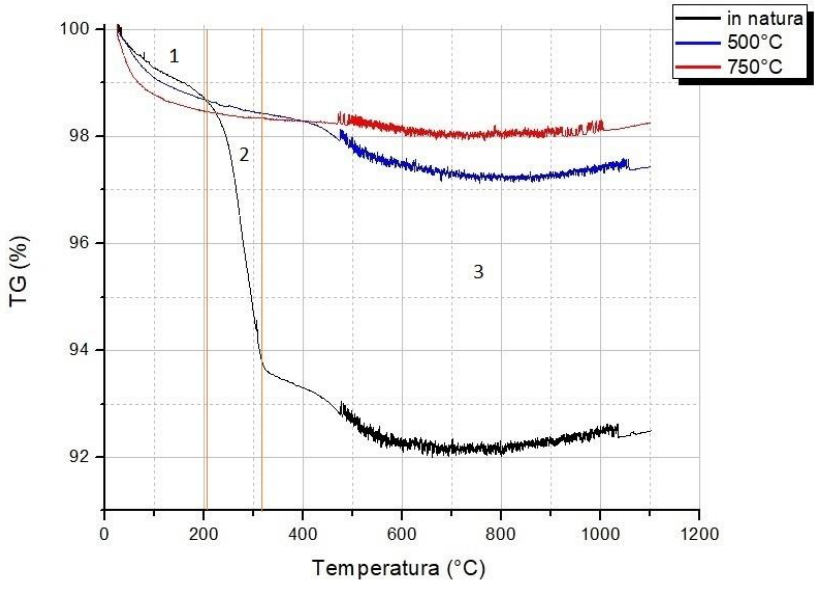
A amostra de rejeito calcinada à 750ºC apresentou granulometria mais grosseira em comparação com os outros rejeitos, porém ainda apresenta granulometria menor que a do cimento.

A granulometria é uma variável de grande importância na avaliação do uso dos materiais como adição para argamassas e concretos. Partículas menores preenchem os poros na pasta de cimento, melhorando algumas propriedades físicas pelo efeito fíler. No caso das pozolanas, a granulometria reduzida gera maior área superficial, aumentando a reatividade do material e favorecendo a reação pozolânica.

5.1.6 – Análise termogravimétrica

Para melhor visualização do efeito da calcinação da amostra de rejeito de minério de ferro nas duas temperaturas propostas, um comparativo entre as curvas das análises termogravimétrica realizada nas três amostras é mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Curvas de análise termogravimétrica das amostras de rejeito



Fonte: Autoria própria

Existem três regiões no gráfico indicando perda de massa sofrida pela amostra de rejeito de minério de ferro *in natura*. A região 1, que ocorre até temperatura de aproximadamente 200ºC, indica a perda de massa devido à dessorção de água da superfície das partículas. Na região 2 é possível verificar uma perda de massa apreciável, de aproximadamente 5%. Nesta faixa de temperatura ocorre a desidroxilação da goethita (FeOOH), transformando-se em hematita (α-Fe_2O_3) (MAGALHÃES, 2008). A região 3 indica a perda de massa de aproximadamente 1,5%, devido a desidroxilação da caulinita, com a formação de metacaulinita.

Observa-se que na região 1, a perda de massa devido a dessorção de água das partículas é semelhante entre todas as amostras. Na região 2, na qual há a desidroxilação da goethita, há perda de massa somente para a amostra de rejeito de minério de ferro *in natura*. A ausência desta variação de massa para as amostras calcinadas indica que a goethita foi totalmente transformada em hematita nesta faixa de temperatura.

Na região 3, ainda é possível observar perda de massa sofrida pela amostra calcinada a 500ºC. Devido a pequena variação de massa neste trecho e o ruído apresentado durante o ensaio, não é possível quantificar a variação entre a massa perdida pela desidroxilação da caulinita na amostra de rejeito *in natura* e a calcinada, porém acredita-se que nesta faixa de temperatura, parte da caulinita já tenha se convertido em metacaulinita.

A curva referente à amostra calcinada a 750ºC não apresenta variação de massa na região 3, indicando que a desidroxilação da caulinita se deu por completo. Os resultados obtidos pela análise termogravimétrica confirmam os resultados obtidos pela difração de raios-x quanto às modificações mineralógicas decorrentes da calcinação do rejeito de minério de ferro.

5.1.7 – Luxan

Os valores das condutividades obtidos pelo ensaio proposto por Luxan *et al.* (1989) são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de Luxan

Material	**Condutividade inicial (mS/cm)**	**Condutividade final (mS/cm)**	**Variação de condutividade (mS/cm)**
Sem adição	7,51	7,34	0,17
Rejeito *in natura*	7,57	6,55	1,02
Rejeito 500°C	7,53	6,09	1,44
Rejeito 750°C	7,55	5,87	1,68

Fonte: Autoria própria

De acordo com os valores de variação de condutividade obtidos, o rejeito *in natura* possui pozolanicidade variável, enquanto os rejeitos calcinados possuem boa pozolanicidade. A variação da conditividade pode estar associada ao consumo do cálcio da solução pelo metacaulim presente nas amostras de rejeitos calcinados. A variação na condutividade dos rejeitos calcinados indica que na temperatura de 500°C, parte da caulinita sofreu desidroxilação, transformando-se em metacaulinita.

Outro fator que pode ter influenciado é a granulometria dos rejeitos. A moagem de alto desempenho em moinho planetário produziu partículas muito finas, que possuem carga elétrica devido à quebra das ligações químicas dos minerais. Estas cargas elétricas podem fazer com que os íons na solução adsorvam fisicamente na superfície das partículas. Esta pode ser a razão da variação da condutividade relativamente alta no rejeito *in natura*, visto que este é composto essencialmente por minerais cristalinos, e portanto, com baixa reatividade.

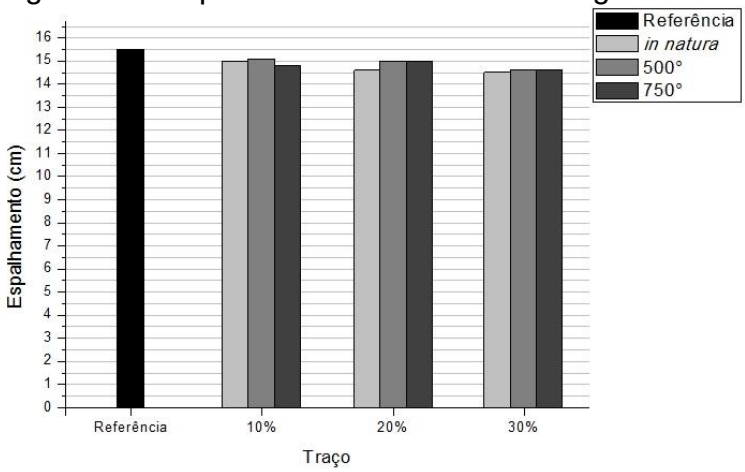
O ensaio foi realizado também sem a adição dos rejeitos, para verificação da variação de condutividade devido à reação do Ca^{2+} com o CO_2 atmosférico. Verificou-se que esta variação foi muito pequena, não tendo influência significativa nos resultados. Pelos resultados obtidos pelo método de Luxan sugerem que os rejeitos de minério de ferro calcinados podem ser considerados materiais pozolânicos.

5.2 – Caracterização dos corpos de prova

5.2.1 – Índice de consistência

Os resultados obtidos durante o ensaio de avaliação de índice de consistência das argamassas são mostrados na Figura 29.

Figura 29 - Espalhamentos médios das argamassas



Fonte: Autoria própria

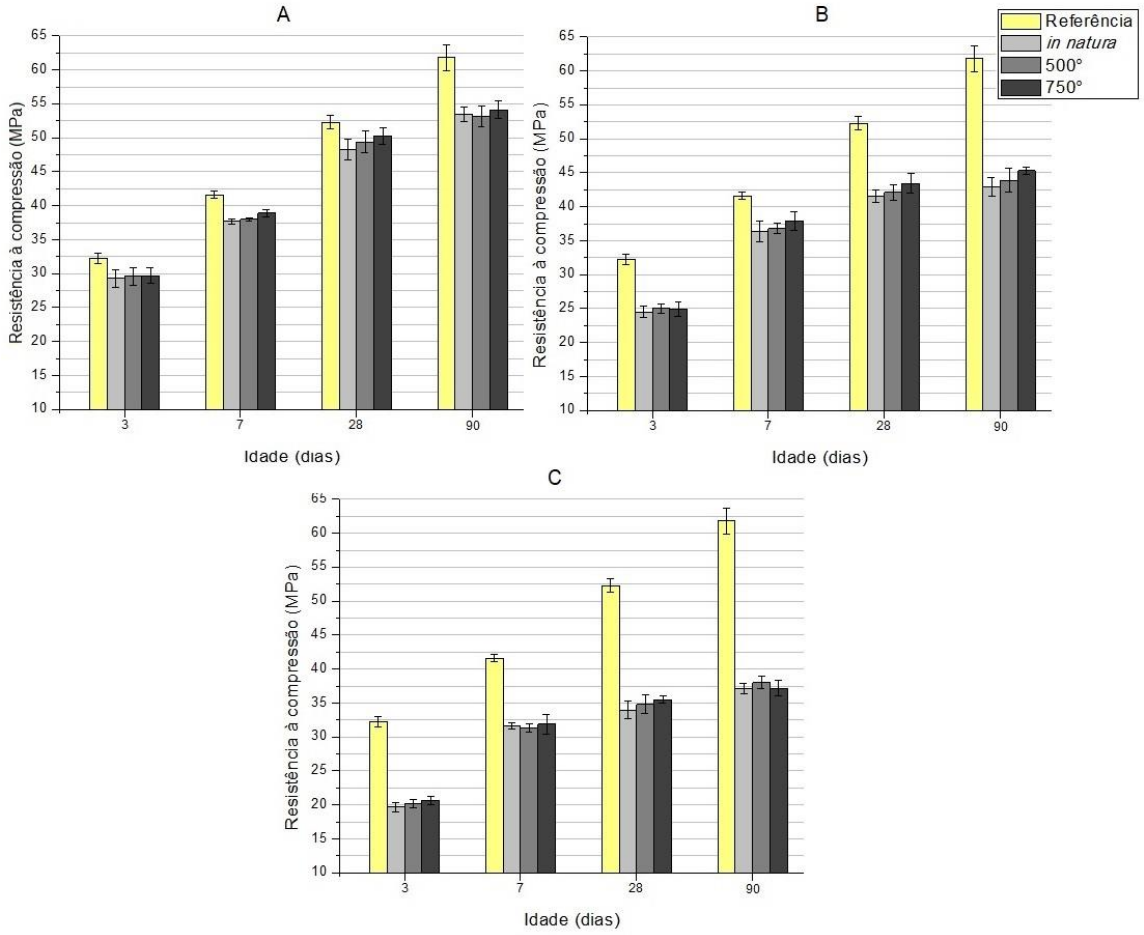
Observa-se que há uma ligeira diminuição no espalhamento das argamassas conforme se aumenta a substituição do cimento pelo rejeito de minério de ferro. Esta diminuição está associada à granulometria mais fina do rejeito, em comparação com a granulometria do cimento, sendo maior a absorção de água por essas partículas. A redução do espalhamento sofreu esta variação pequena pois não houve a inserção de grandes quantidades de partículas finas nas argamassas. A substituição do cimento fez com que a quantidade de partículas finas no sistema se mantivesse relativamente estável.

Apesar da diminuição do espalhamento, a trabalhabilidade das argamassas não sofreu mudança perceptível. Desta forma, dispensou-se o uso de aditivo plastificante para a moldagem dos corpos de prova.

5.2.2 – Resistência à compressão

Na Figura 30 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão realizado nos corpos de prova com as diferentes substituições de cimento pelos rejeitos de minério de ferro.

Figura 30 - Resultados do ensaio de resistência à compressão para os traços de 10% (A), 20% (B) e 30% (C)



Fonte: Autoria própria

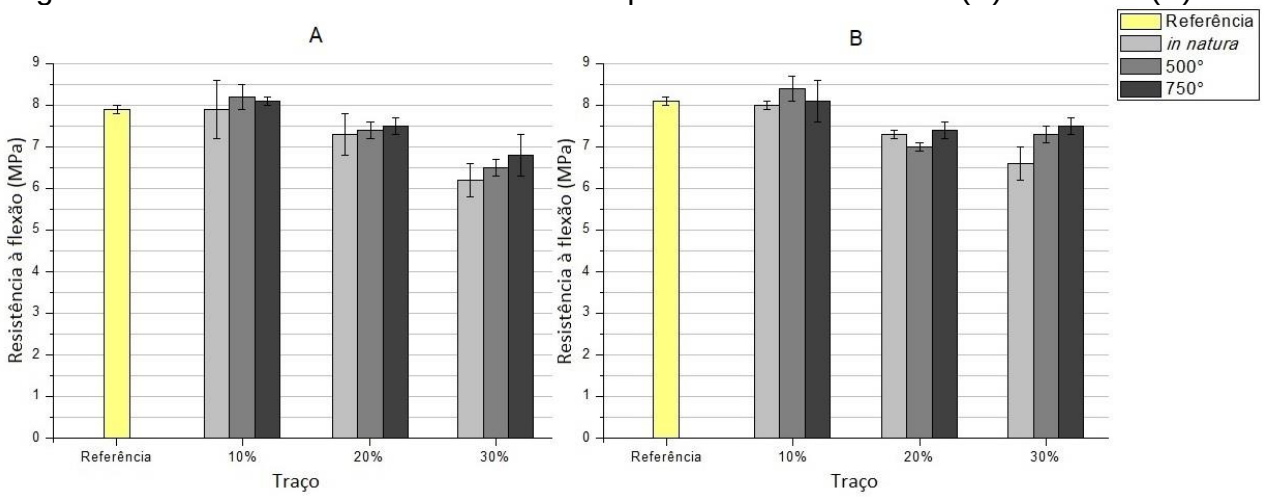
Nota-se que a substituição do cimento pelos rejeitos de minério de ferro resulta em um decréscimo da resistência a compressão, à medida que a substituição aumenta. Para substituições de 10% (Figura 30A), apesar da queda da resistência, foram obtidos valores próximos à resistência da argamassa de referência, especialmente aos 28 dias. Para argamassas com substituições de 20 e 30% (Figura 30B e 30C respectivamente), a queda de resistência é mais pronunciada, sofrendo menor proporção de ganho de resistência em idades avançadas, em comparação com o traço de 10% de substituição.

É importante notar a diferença de resistência obtida entre os traços. As argamassas com substituição pelos rejeitos calcinados demonstraram maior ganho de resistência em comparação com o rejeito *in natura*. Apesar de pequeno, este ganho de resistência está relacionado à reação pozolânica devido à presença de metacaulim nestes rejeitos. Este ganho de resistência é mais significativo nas idades de 28 e 90 dias, visto que a reação pozolânica depende da formação de hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento em idades mais avançadas. Apesar da substituição do cimento pelos diferentes tipos de rejeito de minério de ferro resultarem em uma diminuição da resistência à compressão, todos os traços apresentaram resistência superior a 30MPa aos 28 dias. De acordo com as resistências a compressão obtidas aos 28 dias para argamassas de cimento com 30% de rejeito, *in natura* e calcinados, é possível classificar estas composições como cimento CPI-32, CPII-32, CPIII-32 e CPIV-32 (ABNT, 1991b; ABNT, 1991a; ABNT, 1991c; ABNT, 1991d)

5.2.3 – Resistência à flexão

A Figura 31 ilustra os resultados obtidos durante o ensaio de resistência à flexão.

Figura 31 - Resultados do ensaio de flexão para idades de 28 dias (A) e 90 dias (B)



Fonte: Autoria própria

Observando-se os resultados, é possível verificar que as argamassas com substituição de 10% do cimento pelos rejeitos demonstraram resistência compatível

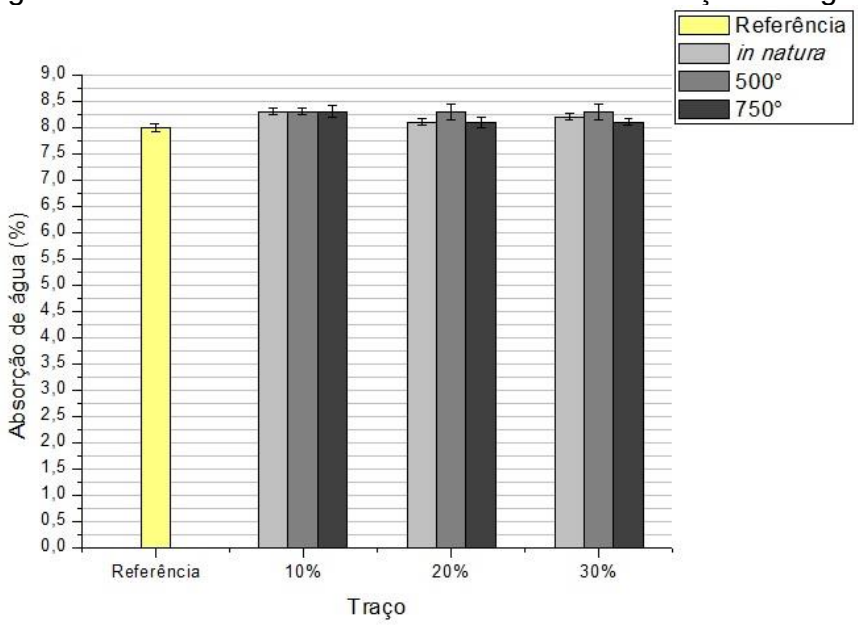
com os corpos de prova de referência, tanto para 28 quanto para 90 dias (Figura 31A e Figura 31B, respectivamente). Para maiores percentuais de substituição de cimento, a resistência à tração na flexão diminui. É possível que para menores substituições, as partículas finas do rejeito tenham atuado no preenchimento de poros, contribuindo para o aumento da resistência.

Também é possível notar o ganho de resistência nos traços que utilizaram rejeito calcinado. Assim como no ensaio de resistência a compressão, este fato pode ser explicado devido à atividade pozolânica que o metacaulim possui.

5.2.4 – Absorção de água e índice de vazios

Os resultados do ensaio de absorção de água, obtidos de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 1987) são mostrados na Figura 32.

Figura 32 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água



Fonte: Autoria própria

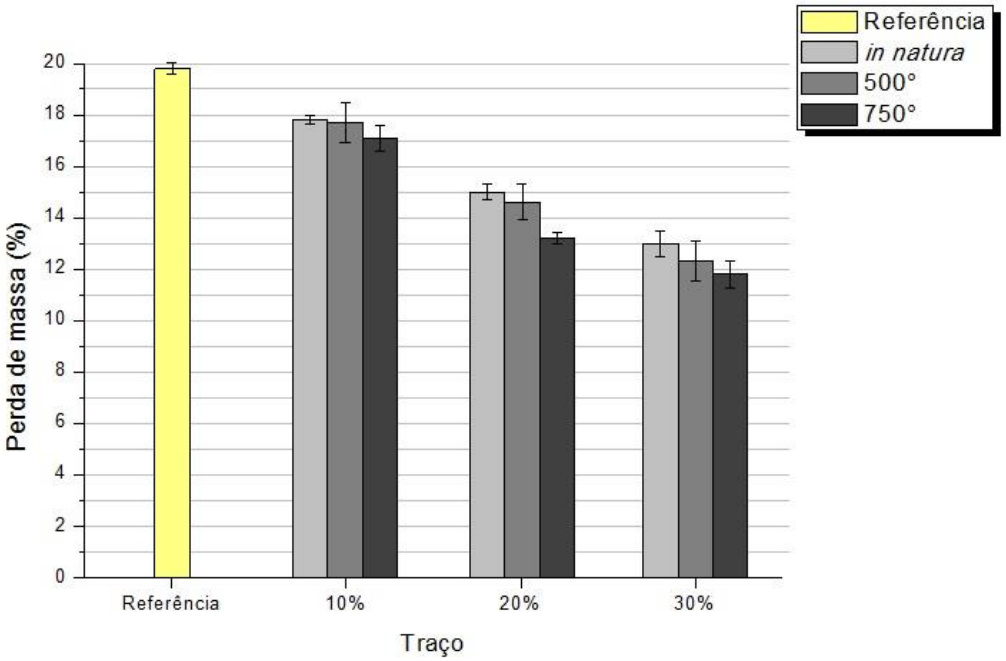
Nota-se pelo gráfico um pequeno aumento da absorção de água (0,3% em média) pelos corpos de prova nos traços que tiveram substituição do cimento pelo rejeito. A

redução da quantidade de cimento gera uma argamassa com menor quantidade de matriz para a aglomeração das partículas, gerando uma estrutura mais porosa. O aumento da quantidade de partículas finas pode ter sido outro fator de influência na porosidade da argamassa, devido a menor compactação durante o processo de moldagem dos corpos de prova.

5.2.5 – Ataque ácido

Os resultados da perda de massa gerada pelo ensaio de ataque ácido são mostrados na Figura 33.

Figura 33 - Perdas de massa nas argamassas após ataque ácido

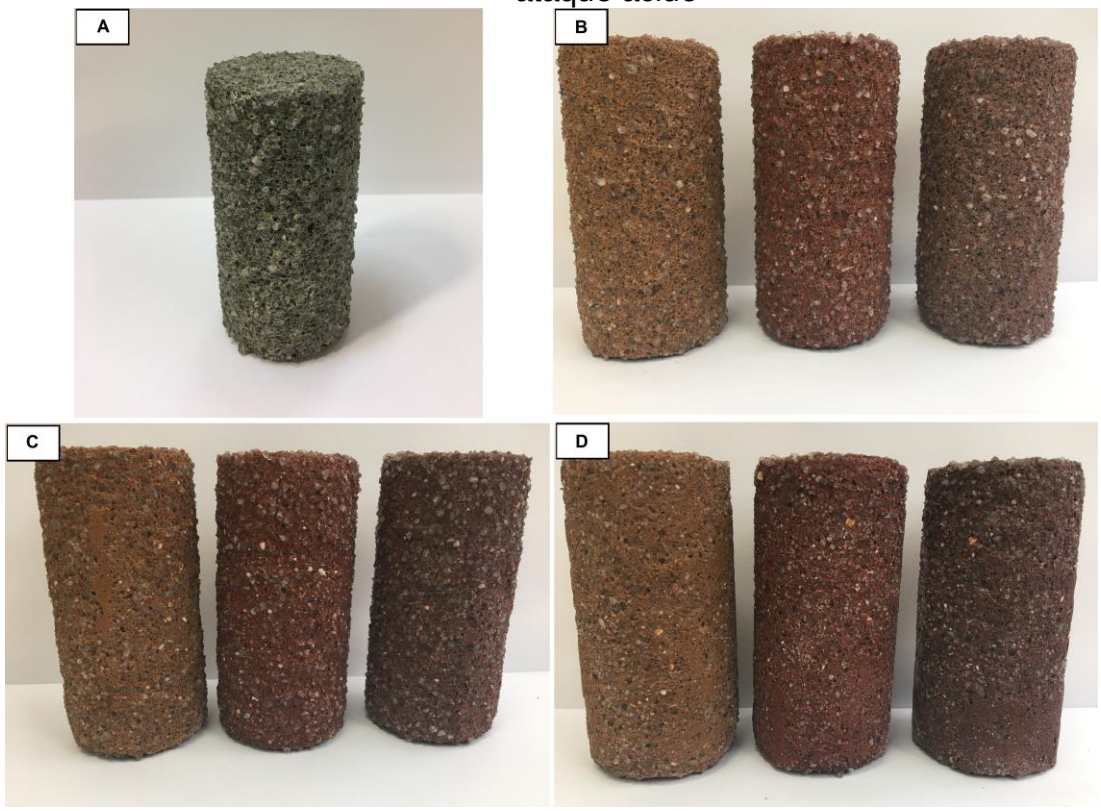


Fonte: Autoria própria

Observa-se que a maior perda de massa ocorreu na argamassa de referência, diminuindo à medida que se aumenta a proporção de cimento substituída pelo rejeito. O hidróxido de cálcio produzido durante a hidratação do cimento é o elemento com maior propensão a reagir com o ácido sulfúrico. As argamassas com maior quantidade de cimento substituída pelo rejeito geraram menor quantidade de hidróxido de cálcio, sofrendo assim degradação menos severa. Na Figura 34 são mostrados os corpos de

prova de referência (A), e com as substituições de 10% (B), 20% (C) e 30%(D) (da esquerda para a direita, *in natura*, 500 e 750°C).

Figura 34 - Corpos de prova de referência (A), 10% (B), 20% (C) e 30% (D) após ataque ácido



Fonte: Autoria própria

Kawai *et al.* (2005) afirmam que a degradação dos produtos da hidratação do cimento se dá somente na superfície dos corpos de prova, devido à dificuldade que o ácido tem de penetrar na estrutura da argamassa endurecida. A reação química entre o ácido sulfúrico e o hidróxido de cálcio produz gesso, um sal insolúvel e de maior volume. A expansão gerada pela formação de gesso faz com que micro fraturas se formem, facilitando a percolação de ácido e acelerando o processo de deterioração da argamassa. Assim, para um mesmo período de tempo, nota-se que os corpos de prova com substituição de 30% do cimento pelo rejeito sofreram menor desgaste mecânico devido ao ataque químico, mostrando até mesmo algumas regiões praticamente intactas.

Outro aspecto observado foi a perda de massa sofrida pela variação do tipo de rejeito utilizado em cada traço. Argamassas produzidas com rejeito calcinado a 500ºC sofreram perda de massa ligeiramente menor do que as produzidas com rejeito *in natura.* Da mesma forma, argamassas nas quais foi utilizado rejeito calcinado a 750ºC sofreram menor perda de massa que as argamassas com rejeito calcinado a 500ºC. A reação pozolânica da metacaulinita presente nos rejeitos calcinados consumiu parte do hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento, diminuindo a disponibilidade deste para reagir com o ácido sulfúrico.

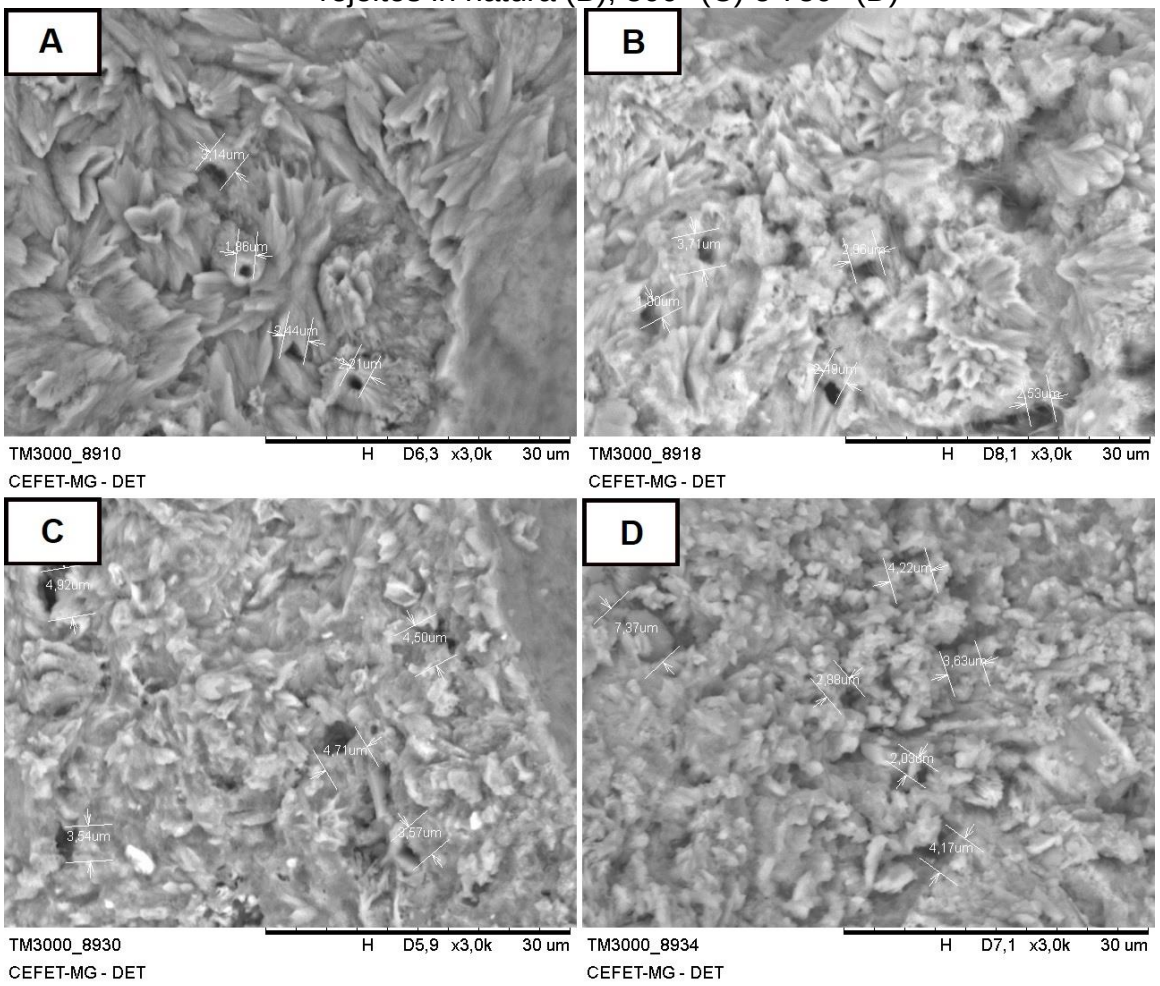
5.2.6 – Microscopia eletrônica de varredura

5.2.6.1 – Microscopia das argamassas

A seguir serão apresentadas as micrografias obtidas por MEV de fragmentos gerados no ensaio de compressão de argamassas com idades de 28 dias.

Na Figura 35 são mostradas micrografias das argamassas de referência (A) e dos traços com 10% de substituição, com os rejeitos *in natura* (B), e calcinados a 500°C (C) e 750ºC (D). Nota-se na argamassa de referência um alto grau de adensamento da matriz, e a presença de alguns poros abertos. As argamassas com as substituições pelos rejeitos, ainda apresentam um bom grau de adensamento, não sendo possível verificar a presença das partículas de rejeito, porém os poros abertos possuem dimensões maiores do que na argamassa de referência.

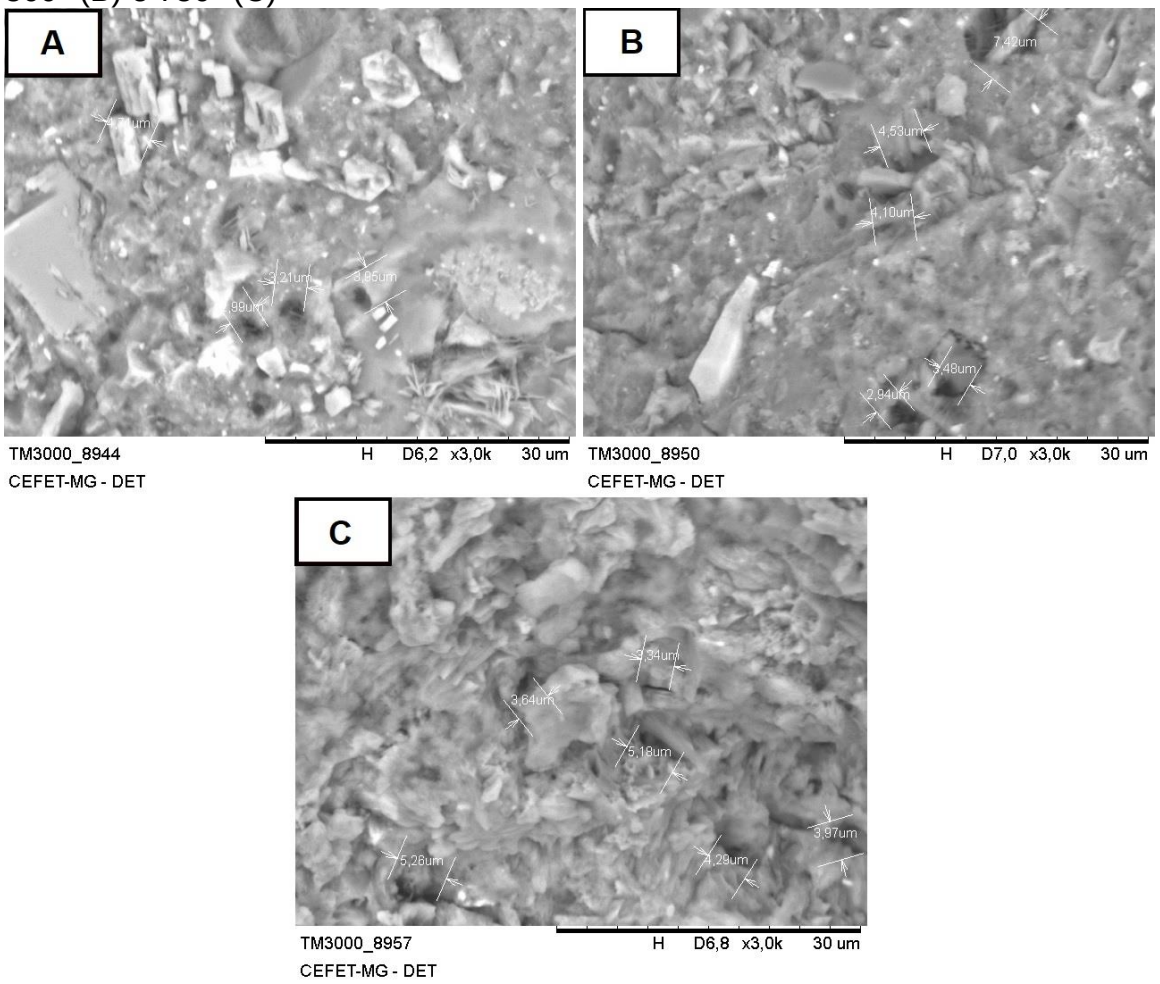
Figura 35 - Micrografias obtidas das argamassas de referência (A) e 10% com rejeitos in natura (B), 500° (C) e 750° (D)



Fonte: Autoria própria

Na Figura 36 são mostradas micrografias das argamassas de referência (A) e dos traços com 20% de substituição, com os rejeitos *in natura* (B), e calcinados a 500°C (C) e 750ºC (D). Neste traço já é possível identificar partículas de rejeito, pela cor mais clara apresentada (maior densidade). Assim como no traço de 10%, os poros formados possuem dimensão maior do que na argamassa de referência.

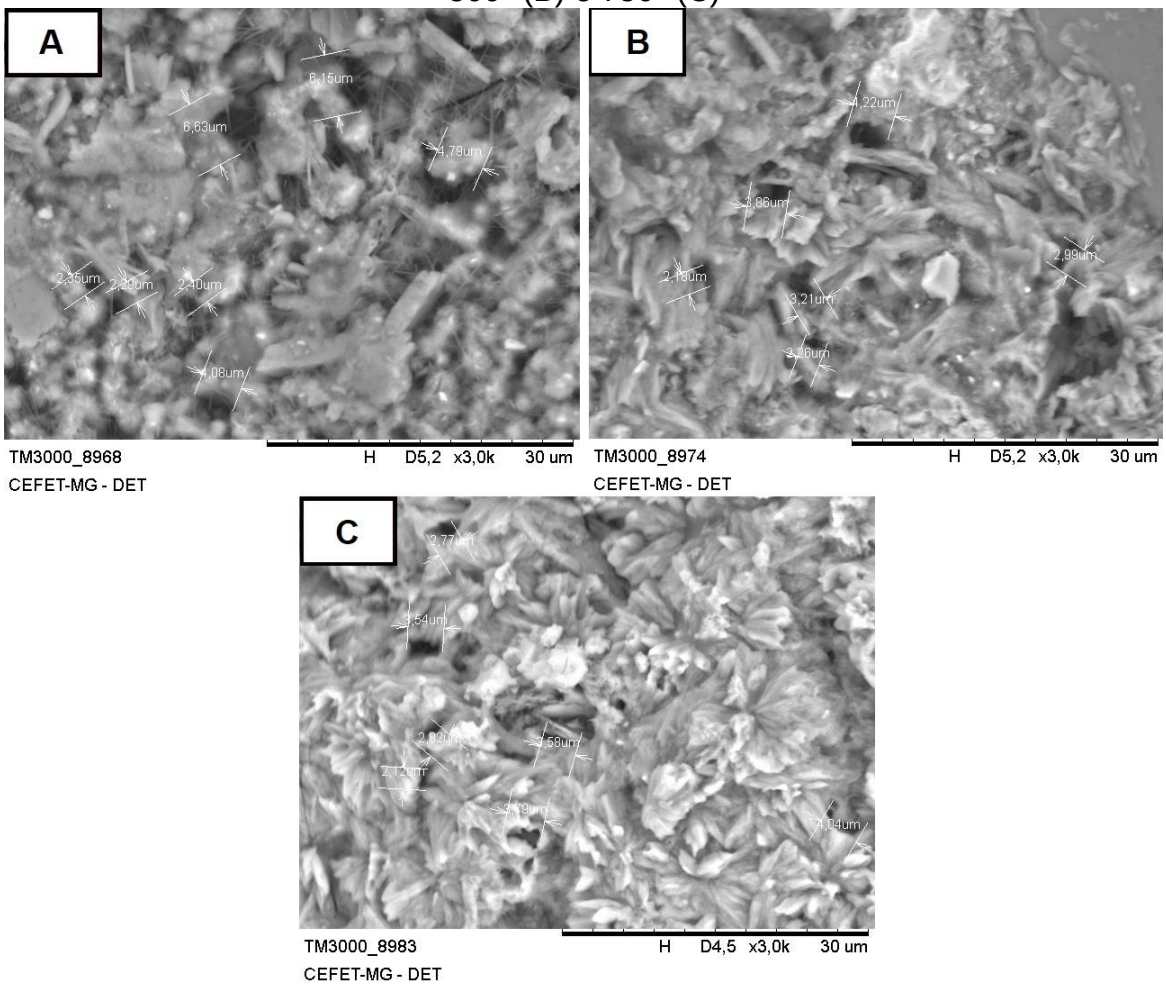
Figura 36 - Micrografias obtidas das argamassas de 20% com rejeitos in natura (A), 500° (B) e 750° (C)



Fonte: Autoria própria

Na Figura 37 são mostradas micrografias das argamassas de referência (A) e dos traços com 30% de substituição, com os rejeitos *in natura* (B), e calcinados a 500°C (C) e 750ºC (D). As argamassas deste traço apresentaram uma textura mais grosseira, além da visualização das partículas de rejeito. Isto indica um menor adensamento desta argamassa devido à maior presença de finos na composição da argamassa. Assim como no traço de 10% e 20%, os poros formados possuem dimensão maior do que na argamassa de referência. A porosidade é um fator que está diretamente ligado à absorção de água nas argamassas. Sendo assim, o aumento dos poros formados nas argamassas com substituição de cimento pelo rejeito justifica o aumento da quantidade de água absorvida pelos corpos de prova durante o ensaio de absorção.

Figura 37 - Micrografias obtidas das argamassas 30% com rejeitos in natura (A), 500° (B) e 750° (C)



Fonte: Autoria própria

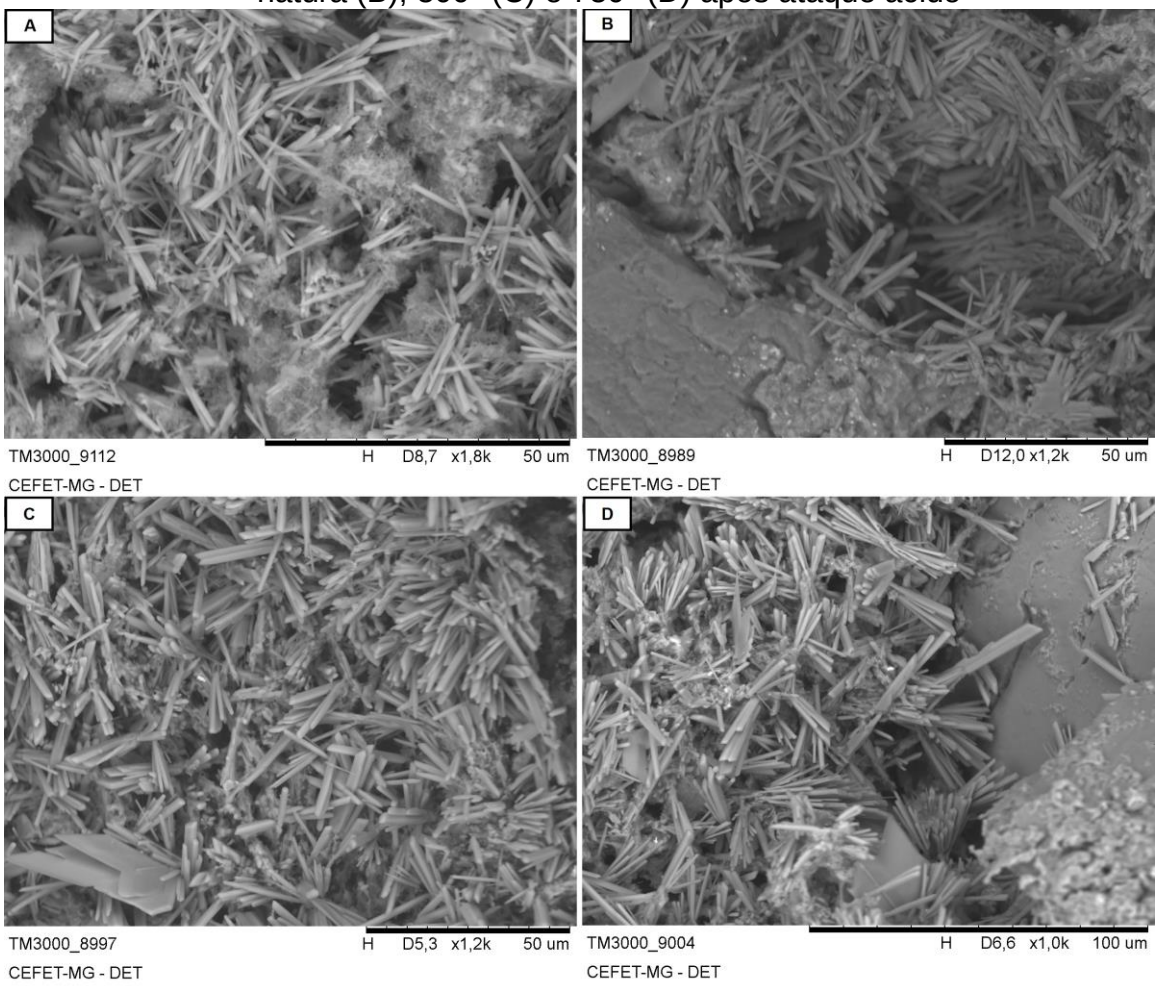
5.2.6.2 – Microscopia das argamassas após ataque ácido

A seguir são apresentadas as micrografias obtidas pelo MEV das argamassas com os diferentes traços após passarem pelo ataque com ácido sulfúrico.

Na figura 38 são mostradas as imagens obtidas para a argamassa de referência (A), e as argamassas com substituição de 10% para o rejeito *in natura* (B), calcinado em 500ºC (C) e 750°C (D). Estes dois traços (referência e 10% de substituição) possuem maior formação de hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento, e, portanto, sofreram ataque mais severo pelo ácido sulfúrico, conforme verificado pelo ensaio de perda de massa. É verificada a formação de grande quantidade de etringita, resultado

da reação entre o ácido sulfúrico e o hidróxido de cálcio. Este sal apresenta-se na forma de cristais aciculares, ocupando um volume maior, fazendo com que a porosidade e permeabilidade da argamassa aumente consideravelmente e o ataque ocorra com uma maior velocidade. É possível visualizar nas imagens fissuras e grandes espaços vazios.

Figura 38 - Micrografia das argamassas de referência (A) e 10% com rejeitos in natura (B), 500° (C) e 750° (D) após ataque ácido

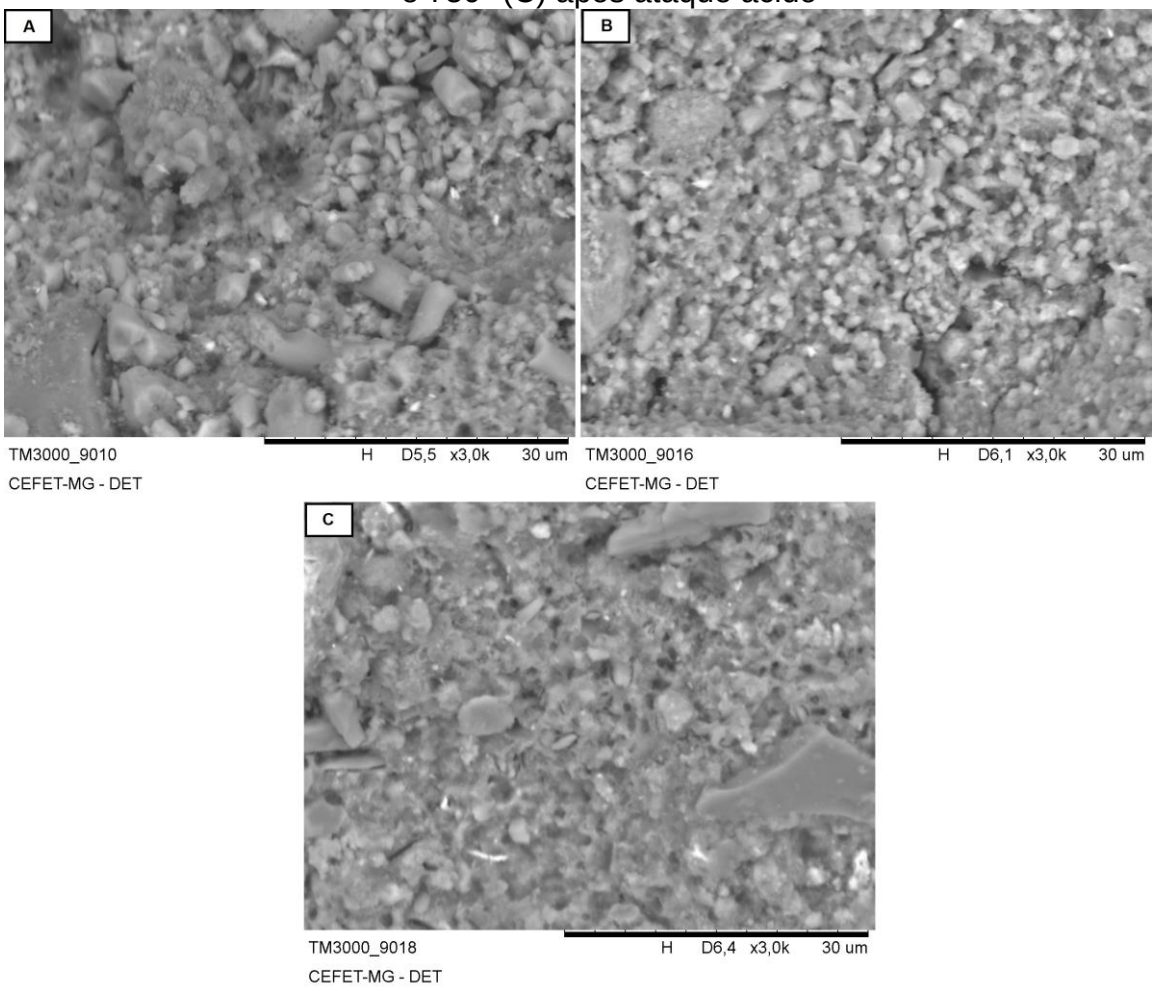


Fonte: Autoria própria

Na figura 39 são mostradas as micrografias dos traços com 20% de substituição utilizando rejeito *in natura* (A), calcinado em 500ºC (B) e 750º (C). Devido à redução do cimento, menor quantidade de hidróxido de cálcio é gerada, sendo assim menor a quantidade de material disponível para a reação com o ácido sulfúrico. Neste traço não foi identificado quantidade significativa de etringita. Além de menor quantidade de material disponível para reação, o reduzido volume de etringita formada pode ter sido

removido durante o processo de lavagem dos corpos de prova para a remoção de material solto. Nas imagens é possível verificar o desgaste devido à exposição das partículas de rejeito. As trincas formadas e o aumento da porosidade são menores em relação ao verificado no traço de 10% de substituição e nos corpos de prova de referência.

Figura 39 - Micrografia das argamassas de 20% com rejeitos in natura (A), 500° (B) e 750° (C) após ataque ácido

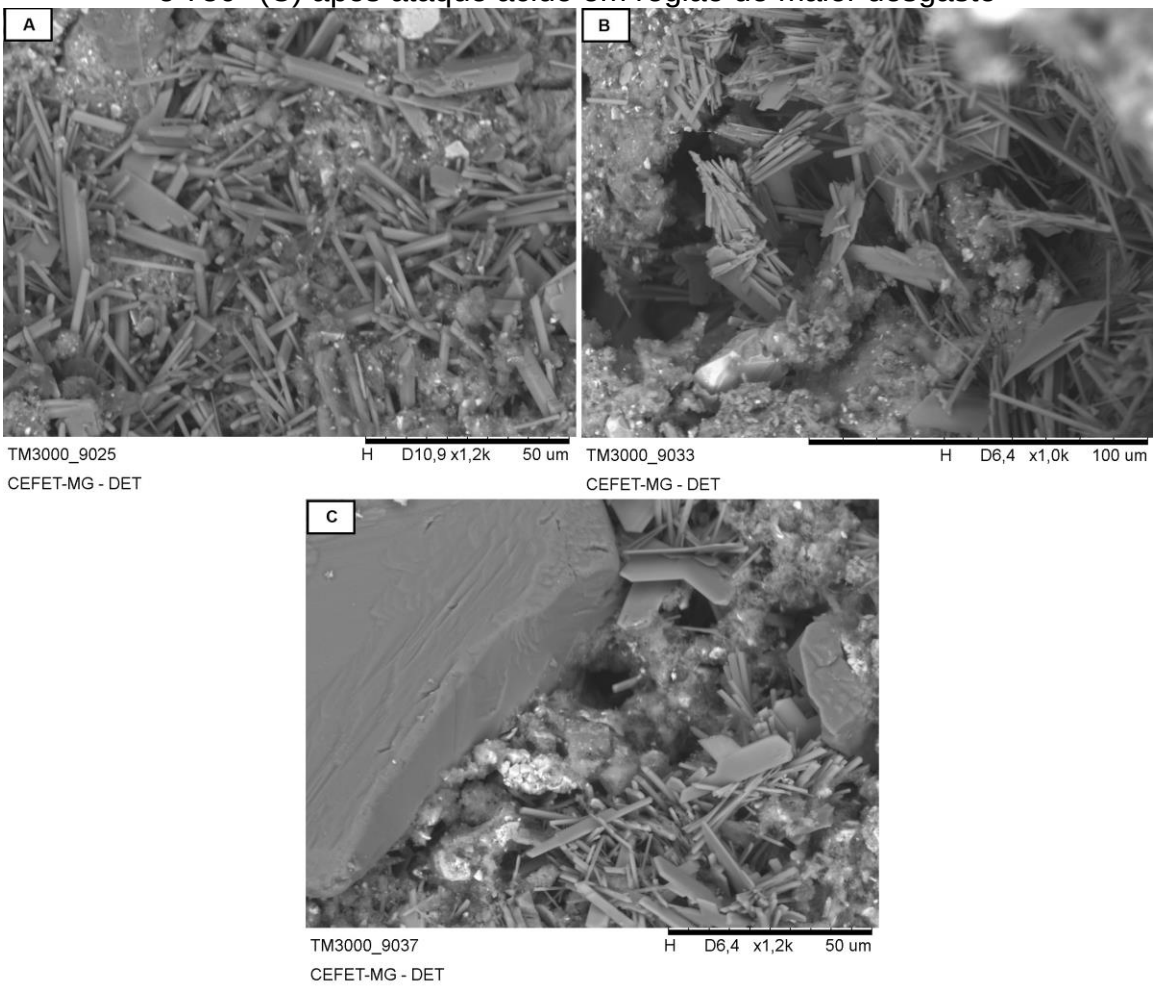


Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova com substituição de 30% do cimento pelo rejeito sofreram menor perda de massa, demonstrando regiões praticamente intactas. Para melhor visualização do efeito do ataque ácido, no traço de 30% a microscopia foi realizada em regiões de maior e menor desgaste.

São mostradas na Figura 40 as regiões atacadas nos corpos de prova com rejeito *in natura* (A), calcinado em 500ºC (B) e 750ºC (C). Apesar de haver a presença de etringita nas amostras, esta se apresenta em quantidade inferior, se comparada com o traço com 10% de substituição, indicando a baixa perda de massa sofrida por esta composição.

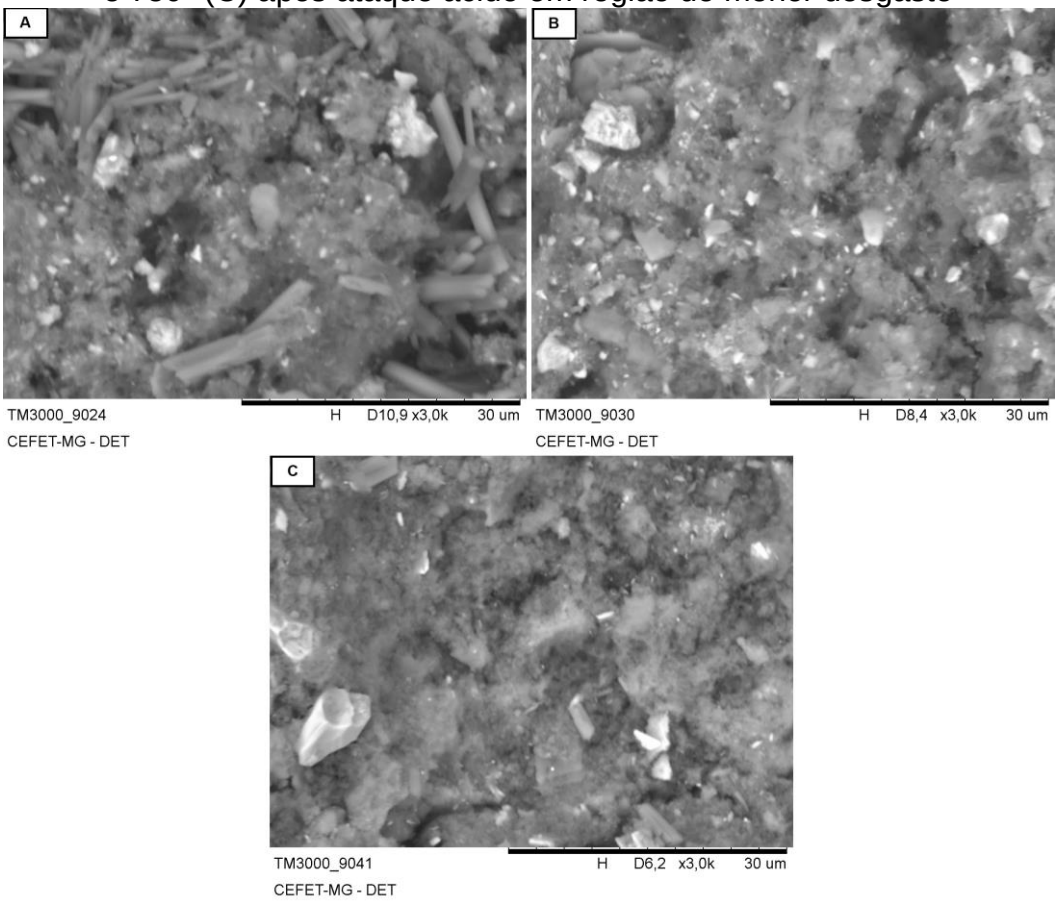
Figura 40 - Micrografia das argamassas de 30% com rejeitos in natura (A), 500° (B) e 750° (C) após ataque ácido em região de maior desgaste



Fonte: Autoria própria

A Figura 41 mostra novamente imagens obtidas em amostras de argamassa com 30% de substituição, porém em uma região pouco atacada pelo ácido.

Figura 41 - Micrografia das argamassas de 30% com rejeitos in natura (A), 500° (B) e 750° (C) após ataque ácido em região de menor desgaste



Fonte: Autoria própria

É possível notar a presença de etringita apenas na argamassa com rejeito *in natura* (A), devido à maior quantidade de hidróxido de cálcio formado em relação as argamassas com rejeito calcinado. Nas argamassas compostas pelo rejeito calcinado a 500 e 750ºC, (B) e (C) respectivamente, nota-se boa coesão apresentada pela matriz, pois somente algumas partículas de rejeito são visíveis.

CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos pelos ensaios de difração e fluorescência de raios-x, o rejeito de minério de ferro é composto basicamente por óxidos de ferro, silício e alumínio, na forma de hematita, goethita, quartzo e caulinita. Após a calcinação, mudanças na mineralogia da amostra foram observadas, em especial na desidroxilação da caulinita.

Para a avaliação do rejeito de minério de ferro in natura e calcinados como material pozolânico, foi realizado ensaio baseado no método de Luxan. Os resultados obtidos pelo método de Luxan sugerem atividade pozolânica para os rejeitos calcinados, visto que houve diminuição da condutividade, comparado com o valor obtido com o rejeito *in natura*.

Os resultados observados nos ensaios de resistência à compressão e flexão indicam que houve atividade pozolânica nos rejeitos calcinados. Para os rejeitos calcinados, foi observada uma pequena melhoria nas propriedades mecânicas das argamassas, devido à presença da metacaulinita originada na calcinação. A porosidade das argamassas não sofreu aumento considerável, fato comprovado pelos ensaios de absorção de água e microscopia eletrônica de varredura.

A substituição do cimento pelo rejeito de minério de ferro teve bons resultados com relação ao ganho de resistência no ataque por ácidos, devido à menor quantidade de hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento.

Considerando os resultados obtidos, a utilização do rejeito de minério de ferro na substituição do cimento em argamassas apresenta vantagens, especialmente na questão de durabilidade. Assim, esta pode ser uma utilização viável para a imobilização deste resíduo industrial.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. A. **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto.** 2009. 74f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ANDRADE, L. C. R. de. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, *in natura* e segregados, para aplicação como material de construção civil.** 2014. 112f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ARAÚJO, A. C. Introdução. In: VALADÃO, G. E. S; ARAÚJO, A.C. (Org). **Introdução ao tratamento de minérios.** Belo Horizonte: UFMG, 2007.

ARISTIMUNHO, P. B.; BERTOCINI, S. R. Aplicação de lama de minério de ferro em forma de pó na presença de cimento Portland. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 153-165, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**:Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991d

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica . Rio de Janeiro, 1987.

BALTAR, C. A. M. **Flotação no tratamento de minérios**. 2ª Ed. Recife: Editora Universitária UFPE, 2010. 232p.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA. G. C. **Concreto:** ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1v.

BRENAND CIMENTOS. **Certificado de ensaios em cimento CP V-ARI MAX**, 2016.

CARNEIRO, B. S. *et al.* Caracterização mineralógica e geoquímica e estudo das transformações de fase do caulim duro da região do Rio Capim, Pará. Revista Cerâmica, n. 49, p. 237-244, 2003.

CHAVES, A. P. *et al.* Flotação. In: LUZ, A. B. **Tratamento de minérios.** 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

CHAVES, A. P.; CHAVES FILHO, R, C. **Teoria e prática do tratamento de minérios:** Separação densitária. 1ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 240p.

CHAVES, L. F. M. **Estudo do resíduo proveniente da extração de minério de ferro em argilas do Rio Grande do Norte.** 2009. 170f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

COELHO, E. F. F. **Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas.** 2008. 100f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

CURI, A. **Minas à ceu aberto:** planejamento de lavra. 1ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 223p.

DAVIES, M. P.; MARTIN, T. E. **Mine tailings dams: when things go wrong in proceedings of tailing dams.** Las Vegas: Association of State Dam Safety Officials, U.S. Committee on Large Dams, 2000. p. 261-273.

DUARTE, A, P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco.** 2008. 130f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico.** 2000. 363f. Tese (Doutorado) –Universidade Federal de Brasília, Brasília.

FONTES, W. C. **Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento.** 2013. 112f. Dissertação (Dissertação) –Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM**. Inventário de resíduos sólidos da mineração, ano base 2015.** Belo Horizonte: FEAM, 2016a. 48 p. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/2017/RESIDUOS/Inventario_Res%C3%ADduos_S%C3%B3lidos_Miner%C3%A1rios_2016_Rev1_COM_FICHA.pdf> Acesso em: 17/01/2017.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM**. Inventário de barragens do estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: FEAM, 2016b. 54 p. Disponível em:<http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS_MINERA%C3%87%C3%83O/Invent%C3%A1rio_de_Barragens_2015_Final_V01.pdf> Acesso em: 17/01/2017.

GAVA, G. P. E**studo comparativo de diferentes metodologias para a avaliação de atividade pozolânica**. 1999. 118p. Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GOBBO, L. de A. **Aplicação da difração de raios-x e método de Rietveld no estudo de cimento Portland.** 2009. 273f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HOT, J. *et al.* An investigation of Ca/Si silica fume characteristics and its possible utilization in cement-based and alkali-activated materials. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 456-465, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Tabela de comércio exterior brasileiro para produtos de origem mineral.** 2016. Disponível em: <http://www.ibram.org.br >Acessado em: 16/01/2017.

JESUS, C. A. G. **Sumário mineral 2015.** Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM, Brasília. 2015. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>Acessado em: 19/01/2017.

KAWAI, K. *et al.* Concrete deterioration caused by sulfuric acid attack. In: International Conferérence on Durability of Building Materials and Components – DBMC, 10, 2005, Lyon. **Anais...**

LINS, F. A. F. Concentração gravítica. In: LUZ, A. B. **Tratamento de minérios.** 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

LOPES, G. M. **Flotação direta de minério de ferro**. 2009. 176f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Our Preto, Ouro Preto.

LUXAN, M. P. *et al.* Rapid evaluation of pozzolanic of natural products by conductivity measurement. **Cement and concrete research**, v. 19, p. 63-68, 1989.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: LUZ, A. B. **Tratamento de minérios.** 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

MACHADO, F.B. *et al.* **Enciclopédia Multimídia de Minerais.** [on-line]. 2003. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/museudpm>. Acessado em: 19/01/2017.

MAGALHÃES, F. **Síntese e caracterização de óxidos de ferro e compósitos para aplicações no tratamento redox de efluentes aquosos.** 2008. 215f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, Povindar Kumar. **Pozzolanic and Cimentitious Materials**. Advances in Concrete Technology. CANMET, Otawa, Ontario, Canada, volume 1,Gordon and Breach Publishers, 1996, 191 p.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica

do ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP) com cal usando difração de raios x. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 19-29, jul./set. 2015.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulímem sistemas binárioscom cimento Portlande hidróxido de cálcio.** 2011. 151f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

MEHTA, P. K. Mineral admixtures. In: RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete admixtures handbook:** properties, science, and technology. Noyes Publications: Park Ridge, 1984.

MEHTA, P. M.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, 2ª. ed., 2014, 751p.

MOLIN, D. C. C. D. Adições minerais. In: ISAIA. G. C. **Concreto:** ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1v.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2ª edição. São Paulo: PINI, 1997, 828 p.

OLIVEIRA, M.P. de; BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição do cimento Portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 490-496, 2006.

PERES, A. E. C. Métodos de concentração. In: VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção.** 11. ed. São Paulo: Globo, 1998. 435p.

RIBEIRO, C. C. *et al.* **Materiais de construção civil.** 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2002. 101p.

SAMPAIO, J. A. *et al.* Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, A. B. **Tratamento de minérios.** 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza da casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 1997. 111f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, F. L. da. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de pavers e cerâmica.** 2014. 127f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

SILVA, J. P. S. **Impactos ambientais causados por mineração.** Revista Espaço da Sophia. n.8. 2007.

SOUZA, C. C. *et al.* Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com

rejeito de minério de ferro. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 194-202, 2008.

TAVARES, L. M. M.; SAMPAIO, C. H. **Beneficiamento gravimétrico:** uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**.** 1. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2005. 602p.

TOFFOLO, R. V. M. *et al.* Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro. In: Congresso Brasileiro do Concreto – CBC, 56., 2014, Natal. **Anais...**

U.S. Geological Survey - USGS. **Mineral commodity summaries 2016: U.S. Geological Survey**. 205 p. 2016. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf> Acesso em: 16/01/2017.

VALLOUREC MINERAÇÃO. Fluxugrama do processo de concentração mineral. No prelo, 2017

WEBER, S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz.** 2001. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da VALE.** 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

WORRELL, E. *et al.* Carbon dioxide emissions from the global cement industry. **Annual Review Energy and the Environment**, v. 26, n. 1, p. 303-29, 2001.