



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

RAYANNE DE JESUS ANDRADE FIDELIS

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE REJEITOS DE FOSFATOS COMO MATERIAL
POZOLÂNICO**

**ARAXÁ/MG
2018**

RAYANNE DE JESUS ANDRADE FIDELIS

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE REJEITOS DE FOSFATOS COMO MATERIAL
POZOLÂNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais–CEFET/MG, como registro parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.
Coorientador: Prof. Me. Douglas Geraldo Magalhães.

ARAXÁ/MG
2018

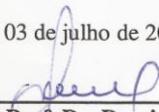
FOLHA DE APROVAÇÃO

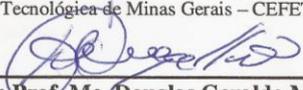
RAYANNE DE JESUS ANDRADE FIDELIS

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE REJEITOS DE FOSFATOS COMO MATERIAL
POZOLÂNICO**

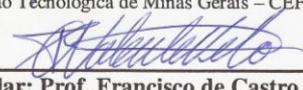
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais- CEFET/MG, como registro parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

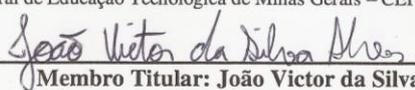
Araxá, 03 de julho de 2018.


Presidente e Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá


Coordenador: Prof. Me. Douglas Geraldo Magalhães
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá


Membro Titular: Prof. Me. Fernanda Ribeiro Jordão
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá


Membro Titular: Prof. Francisco de Castro Valente Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá


Membro Titular: João Victor da Silva Alves
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

Aos meus pais Raymundo e Vera, que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, por ter me concedido sabedoria para alcançar este objetivo e por me amparar nos momentos difíceis. Sem ele, esse sonho jamais teria sido realizado.

Aos meus pais, Raymundo e Vera, que sempre se doaram e abriram mão de muitos dos seus sonhos para viverem o meu. Por terem sempre me apoiado nas decisões, muitas vezes difíceis, que tive que enfrentar até aqui. Por acreditarem na minha capacidade e por confiarem em mim. Também agradeço à minha irmã que sempre esteve ao meu lado. Amo vocês.

Em especial, agradeço aos professores Domingos Sávio de Resende e Douglas Geraldo Magalhães pela orientação, paciência, dedicação e pela confiança depositada em mim e no meu trabalho. A vocês toda minha gratidão e admiração.

Aos técnicos dos laboratórios pelo auxílio durante a realização dos testes laboratoriais.

Agradeço aos meus amigos, que fizeram desta etapa da minha vida inesquecível.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

EPIGRÁFE

Eu acredito demais na sorte. E tenho constatado que, quanto mais duro eu trabalho, mais sorte eu tenho.

Thomas Jefferson.

RESUMO

A mineração é uma atividade responsável pela geração de grandes volumes e massas de resíduos provenientes dos processos de extração e beneficiamento de minérios. A disposição de material acarreta em impactos ao meio ambiente, como por exemplo, poluição de águas e de solo. Devido a tais problemas, atualmente, estão sendo realizados estudos de alternativas para o aproveitamento de rejeitos de mineração, tanto para obtenção de novos concentrados quanto para aplicação em outras áreas, como na construção civil. Partindo deste contexto este trabalho buscou analisar a aplicação do rejeito de minério fosfatado como material pozolânico. O trabalho foi desenvolvido de modo a determinar os requisitos químicos e físicos estabelecidos pela ABNT NBR 12653/2012. O rejeito estudado foi caracterizado quanto à composição química por Fluorescência de Raios-X, quanto à mineralogia através de Difração de Raios X, quanto à granulometria por Difração a *laser*. Para a caracterização tecnológica do material também foram executados testes para determinação de umidade, densidade e ensaios de calcinação. Para a verificação da atividade pozolânica, foi utilizado o Método de Luxàn. Os resultados obtidos mostraram que o rejeito de minério fosfatado apresenta atividade pozolânica moderada e tem potencial para aplicação como material pozolânico de classe E na indústria da construção.

Palavras-chave: rejeitos de minérios fosfatados; materiais pozolânicos; caracterização tecnológica.

ABSTRACT

Mining is an activity responsible for the generation of large volumes and masses of waste from ore extraction and beneficiation processes. The disposal of material causes impacts on the environment, such as water and soil pollution. Due to these problems, studies are currently being carried out on alternatives for the use of mining tailings, both for obtaining new concentrates and for application in other areas, such as construction. From this context, this work sought to analyze the application of the phosphate ore tail as pozzolanic material. The work was developed in order to determine the chemical and physical requirements established by ABNT NBR 12653/2012. The studied tailings was characterized in terms of chemical composition by X-Ray Fluorescence, in relation to the mineralogy by X-ray Diffraction, as for the granulometry by laser diffraction. For the technological characterization of the material, tests were also carried out to determine moisture, density and calcination tests. For the verification of pozzolanic activity, the Luxan Method was used. The results showed that the phosphate ore reject exhibits moderate pozzolanic activity and has potential for application as a class E pozzolanic material in the construction industry.

Keywords: phosphatic ore tailings; pozzolanic materials; technological characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Distribuição do consumo de rocha fosfática pelos diferentes setores industriais no ano de 2005.....	18
Figura 2 - Barragem de rejeito B3 da mina Casa de Pedra, Congonhas-MG.....	20
Figura 3 - Ruptura da barragem de rejeitos de Mariana.....	21
Figura 4 - Blocos de pavimentação fabricados com rejeitos de minério de ferro.	22
Figura 5 - Produção do cimento Portland.....	25
Figura 6 - Fluxograma dos processos de fabricação do cimento Portland.....	27
Figura 7 - Fluxograma de classificação das pozolanas.....	32
Figura 8 - Exemplos de pozolanas artificiais. a) Cinzas volantes. b) Escórias de alto-forno. c) Sílica ativa.	33
Figura 9 - Efeito da substituição parcial do cimento Portland por uma pozolana natural sobre o calor de hidratação do cimento Portland.	37
Figura 10 - Barragem de rejeito de minério fosfatado de origem sedimentar.....	40
Figura 11- Preparação de amostra para testes de picnometria, análises granulométrica, química e mineralógica. a) Rejeito em uma bandeja antes de ser levado para estufa. b) Rejeito sendo desaglomerado e passado por uma peneira de 0,42 mm de abertura. c) Homogeneização do rejeito por pilha alongada.	41
Figura 12- Picnometria. a) Picnômetros vazios. b) Picnômetros + amostra. c) Picnômetros + amostra + água. d) Picnômetros + água.	42
Figura 13- Cilas 1090 Laser Particle Size Analyzer.....	43
Figura 14 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por energia dispersiva.....	44
Figura 15- Difrátômetro de Raios-X.....	45
Figura 16 - Cadinhos com amostras na estufa à temperatura de 105°C.	45
Figura 17- Teste de perda ao fogo. a) Cadinho de porcelana com amostra de rejeito de minério fosfatado. b) Cadinho com amostra na mufla à 1000°C. c) Cadinho com amostra no dessecador.	46
Figura 18- Método de Luxàn. a) 2 gramas de hidróxido de cálcio P.A.. b) 200 gramas de água destilada em um béquer de 1000 mL. c) Béquer com a água destilada em agitação e sendo aquecida até 40C.....	47
Figura 19- Método de Luxàn. a) Solução supersaturada de hidróxido de cálcio P.A.. b) Adição até 1000 gramas de água de destilada a solução.....	48

Figura 20- a) solução de hidróxido de cálcio P.A. filtrada. b) Medição da condutividade da solução filtrada. c) Adição de 5 gramas de amostra a solução para posterior medição da condutividade.....	48
Figura 21-Distribuição Granulométrica do rejeito.....	50
Figura 22 - Análise mineralógica do rejeito por Difração de Raios-X.....	53
Figura 23 - Amostra de minério fosfatado. a) Minério com camadas claras (argila) e camadas escuras (fluorapatita) e fraturas preenchidas por quartzo. b) Minério dobrado.	54
Figura 24- Índice de atividade pozolânica.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de cimento no Brasil em 2014.	23
Tabela 2- Composição química do cimento Portland.	25
Tabela 3 - Teores dos componentes dos cimentos Portland comum e composto.....	29
Tabela 4 - Teores dos componentes dos cimentos Portland de alto forno.	30
Tabela 5 - Teores dos componentes dos cimentos Portland pozolânico.	30
Tabela 6 - Classificação dos materiais pozolânicos.....	33
Tabela 7 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos.....	34
Tabela 8 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos.....	34
Tabela 9 - Limites para ensaios facultativos.	34
Tabela 10- Ensaios para determinação de propriedades dos materiais pozolânicos.....	35
Tabela 11 - Classificação da Pozolana pela Condutividade Elétrica.....	39
Tabela 12- Densidade do rejeito por picnometria.....	49
Tabela 13- Análise química elementar da amostra de rejeito.....	51
Tabela 14- Análise química de óxidos.....	52
Tabela 15- Umidade do rejeito de minério fosfatado.	55
Tabela 16- Ensaio de perda ao fogo.....	56
Tabela 17- Índice de atividade pozolânica do rejeito.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEFI	Associação dos Arquitetos, Agrônomos e Engenheiros de Foz do Iguaçu
CP I	Cimento Portland Comum
CP II	Cimento Portland Composto
CP III	Cimento Portland de Alto Forno
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raios X
FDC	Fundação Dom Cabral
FRX	Fluorescência de Raios X
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma Mercosul

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
g	Gramma
mL	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
mS/cm	Milisiemens por centímetro
Mt	Milhões de toneladas
°C	Graus Celsius
µm	Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	MINERAÇÃO DE MINÉRIOS FOSFATADOS NO BRASIL	18
2.2	REJEITOS GERADOS NA MINERAÇÃO.....	19
2.3	IMPORTÂNCIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL COMO RECEPTORA DE RESÍDUOS SÓLIDOS	22
2.4	MATERIAIS CIMENTÍCIOS	24
2.5	ADIÇÕES MINERAIS NOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.....	31
2.6	MATERIAIS POZOLÂNICOS	31
2.6.1	CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	33
3	Metodologia	40
3.1	COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....	40
3.2	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO REJEITO.....	41
3.2.1	DENSIDADE OU MASSA ESPECÍFICA.....	41
3.2.2	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR DIFRAÇÃO A LASER.....	43
3.2.3	ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	43
3.2.4	ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	44
3.2.5	UMIDADE.....	45
3.2.6	PERDA AO FOGO.....	46
3.3	VERIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA PELO MÉTODO DE LUXÀN	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	49
4.1.1	DENSIDADE OU MASSA ESPECÍFICA.....	49
4.1.2	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR DIFRAÇÃO A LASER.....	50
4.1.3	ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X	51
4.1.4	ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	53
4.1.5	UMIDADE.....	54
4.1.6	PERDA AO FOGO.....	55

4.2	VERIFICAÇÃO DA DO ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA PELO MÉTODO DE LÚXAN.....	56
5	CONCLUSÕES	58
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
7	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A mineração possui grande importância econômica tanto no Brasil como no mundo. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2016), no ano de 2016 foram exportados 394 milhões de toneladas de minérios que representaram US\$ FOB 21,6 bilhões. Os produtos que tiveram destaque na exportação foram o minério de ferro, o ouro, o ferronióbio, o cobre, a bauxita, o manganês, as pedras naturais e de revestimentos e o caulim.

Essa atividade é responsável pela movimentação de grandes volumes e massas de resíduos provenientes dos processos de extração e beneficiamento de minérios. A quantidade de resíduos gerada está relacionada ao tipo de lavra, aos métodos de extração e às técnicas de concentração que são utilizadas, variando a depender do bem mineral.

Existem dois tipos de resíduos sólidos provenientes da mineração: o estéril e o rejeito. O estéril é o material gerado na lavra que não possui valor econômico, enquanto que o rejeito é a massa sem valor econômico agregado resultante do beneficiamento mineral (SILVA; VIANA; CAVALCANTE, 2012). Ambos demandam um tratamento e deposição adequados para evitar impactos ao ambiente.

O descarte de resíduos pode ser feito a granel, quando o material é transportado por caminhões ou correias transportadoras ou em polpa (mistura de água e sólidos) que é transportada por meio de tubulações com o auxílio de sistemas de bombeamento e gravidade. A escolha de um método de deposição desse material depende: da natureza do processo de mineração, da geologia e topografia da região, propriedades mecânicas do resíduo, impacto ambiental e condições climáticas da região.

O estéril, normalmente, é disposto em pilhas, enquanto que as formas mais comuns de deposição de rejeito são os diques de contenção e as barragens. No entanto, todas essas maneiras necessitam de uma área extensa para a sua implantação.

No caso das barragens, existe uma dificuldade de implantação dessas estruturas, visto que esse tipo de deposição de rejeito é conhecido por gerar impactos ambientais significativos. Acidentes envolvendo principalmente rupturas podem ocorrer e acarretam em descargas de grandes volumes de rejeitos no meio ambiente (DUARTE, 2008). Além de causar impactos relevantes na fauna e na flora, a comunidade local também é afetada.

Devido a tais problemas, atualmente, estão sendo realizados estudos de alternativas para o aproveitamento desses materiais. Alguns desses estudos visam o beneficiamento dos rejeitos para a obtenção de novos concentrados, enquanto outros têm como objetivo empregar esses materiais em outras áreas, como por exemplo, na construção civil.

Os rejeitos provenientes do tratamento de minérios fosfatados, em geral, são compostos por argila. Esse tipo de material, dependendo de determinadas propriedades, pode ser aplicado como material pozolânicos na construção civil, que é um setor responsável por elevado consumo de recursos naturais.

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso foi estudar a aplicação para rejeitos gerados na mineração de minérios fosfatados como material pozolânico. Tendo como objetivos específicos, a caracterização tecnológica do rejeito final proveniente do tratamento de minério de fosfatos e análise da viabilidade de aplicação para o rejeito.

O trabalho está dividido em quatro capítulos principais. O primeiro capítulo demonstra a revisão bibliográfica realizada, o segundo mostra a metodologia utilizada na realização dos testes e ensaios executados, já o terceiro apresenta os resultados obtidos e as discussões do mesmo, e o último expõe as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica acerca dos rejeitos de minérios fosfatados e as suas possíveis aplicações.

2.1 MINERAÇÃO DE MINÉRIOS FOSFATADOS NO BRASIL

O fosfato compõe um grupo conhecido como agrominerais, também fazem parte desse grupo o enxofre e o potássio. Em virtude de ser um país essencialmente agrícola, o Brasil é um grande consumidor de fosfato, principalmente na forma de fertilizantes. O país é o 4º maior consumidor mundial de rocha fosfática, medido em toneladas de P_2O_5 , com 9% do consumo mundial, atrás da China (29%), Índia (16%) e dos Estados Unidos (11%) (MME, 2009). Contudo, a produção desses insumos no Brasil é insuficiente, dependendo, dessa forma, de importações para serem utilizados. A Figura 1 apresenta a distribuição do consumo de rocha fosfática pelos diferentes usos industriais no ano de 2005.

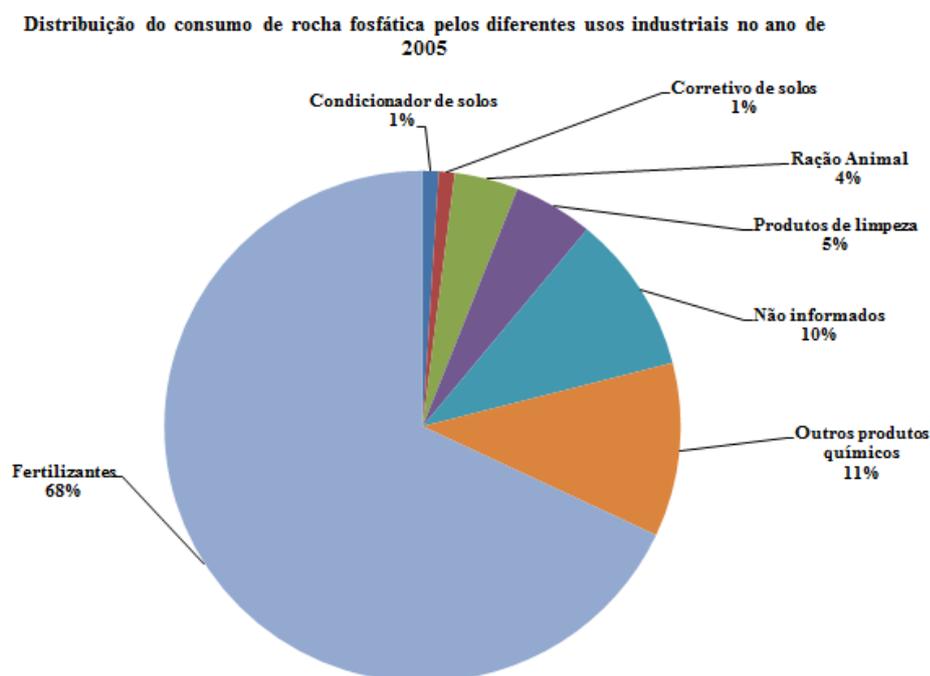


Figura 1- Distribuição do consumo de rocha fosfática pelos diferentes setores industriais no ano de 2005.
Fonte: Adaptado MME (2009).

No cenário mundial, os depósitos de origem sedimentar e de origem ígnea são os mais importantes do ponto de vista econômico. Os depósitos de origem biogenética possuem menor importância econômica. No Brasil, aproximadamente 80% das jazidas fosfáticas

naturais (fosfatos) são de origem ígnea com baixos teores de P_2O_5 (SOUZA; FONSECA, 2009).

Segundo Pinto *et al.* (2011), as reservas brasileiras medidas de rocha fosfática atingem 222 milhões de toneladas de P_2O_5 e estão concentradas principalmente nos estados de Minas Gerais, Santa Catarina, São Paulo e Goiás. A maioria dessas reservas está associada a ambientes geológicos vulcânicos, constituindo os depósitos ígneos.

Aproximadamente 91,5% dessas reservas estão concentradas somente em nove municípios, sendo o município de Tapira o maior detentor de fosfato com 32,6%, seguidos de Patos de Minas (11,9%) e Araxá (8,8%), todos no estado de Minas Gerais. Em Goiás, os municípios que se destacam são Catalão (7,1%) e Ouidor (6,8%). O Estado de São Paulo é representado pelos municípios de Cajati (3,4%) e Iperó (2,8%). No Estado de Santa Catarina o município Anitápolis detém 4,6% (SOUZA; FONSECA, 2009).

A rocha fosfática, em geral, depois de extraída, é encaminhada para usinas de beneficiamento, onde é tratada para atingir um produto com o teor de P_2O_5 adequado. Conforme Loureiro *et al.* (2005), os processos de beneficiamento de minérios fosfáticos, no Brasil, compreendem as seguintes operações:

- Britagem (primária, secundária e até terciária, ocasionalmente);
- Estocagem e homogeneização;
- Moagem e separação magnética de baixo campo;
- Moagem e separação magnética de alto campo;
- Deslamagem;
- Concentração por flotação;
- Espessamento.

Os concentrados fosfáticos produzidos apresentam teores entre 30 e 38% de P_2O_5 e são encaminhados para o mercado, onde são utilizados, em grande parte, como fontes primárias e únicas de fósforo na fabricação dos fertilizantes.

2.2 REJEITOS GERADOS NA MINERAÇÃO

Os rejeitos gerados pela atividade de mineração são os resíduos sólidos, resultantes da etapa de tratamento de minérios, que não possuem valor econômico. Podem conter elevado grau de toxicidade, partículas dissolvidas ou em suspensão, além de metais pesados e reagentes (GOMES, 2017). É gerada uma enorme quantidade desses resíduos. Esse material é

transportado para locais onde são dispostos, temporária ou permanentemente, dependendo dos objetivos da empresa.

Segundo Lozano (2006), a deposição de rejeitos pode ser realizada de diversas formas, entre elas, a céu aberto, de forma subterrânea e subaquática. O modo de disposição a céu aberto é o mais empregado, podendo ser feita em pilhas, diques ou barragens. Opta-se pela forma subterrânea quando se objetiva preencher câmaras depois da extração do minério em profundidade. A forma de deposição subaquática não é muito empregada devido aos problemas ambientais que pode gerar. A Figura 2 representa a barragem B3 da Mina Casa de Pedra localizada em Congonhas em Minas Gerais.



Figura 2 - Barragem de rejeito B3 da mina Casa de Pedra, Congonhas-MG.
Fonte: DAM Projetos de Engenharia.

A deposição desse material acarreta em impactos ao meio ambiente, entre os principais danos causados nas regiões próximas aos locais onde são dispostos os rejeitos estão a poluição da água e a poluição do solo. Esses impactos negativos causados ao meio físico são agravados dependendo da situação. Existem casos de rupturas de barragens que não só tiveram consequências locais como afetaram uma grande região, como pode ser visto na Figura 3.



Figura 3 - Ruptura da barragem de rejeitos de Mariana.

Fonte: Estado de São Paulo, 2015.

A gestão de resíduos possui grande importância, pois permite reduzir os danos ao meio ambiente, além de possibilitar o aproveitamento desses rejeitos, seja como subproduto da própria empresa ou na comercialização em outro setor. O aproveitamento dos descartes da mineração pela indústria civil está sendo cada vez mais utilizado, reduzindo assim, os preços e o consumo de matérias-primas e de energia.

As aplicações dos rejeitos da mineração dependem de alguns fatores, sendo os mais importantes, as características dos depósitos minerais, que influenciam as propriedades químicas, físicas e mecânicas dos resíduos. As principais aplicações para esses materiais são: argamassas, vidros, tintas, manilhas, corretivos de solos, cimento, agregados para a construção civil e pavimentação. A Figura 4 ilustra blocos de pavimentação fabricados com rejeito de minério de ferro, exemplo de aplicação de rejeitos provenientes da mineração.



Figura 4 - Blocos de pavimentação fabricados com rejeitos de minério de ferro.
Fonte: Universidade Federal de Ouro Preto.

Segundo o Relatório de Pesquisa em Ciência, Desenvolvimento e Tecnologia (2016) da Universidade Federal de Ouro Preto, desenvolveu-se um estudo para aplicação de rejeitos de barragens de minério de ferro como fração inerte para matrizes de cimento Portland em obras de Infraestrutura e Construção Civil. Neste estudo, foram realizadas caracterizações física, química e mecânica, análises de produção de matrizes cimentícias e fabricação de elementos pré-moldados, além de estudos de viabilizações. Como resultado, o rejeito se mostrou técnica, econômica e ambientalmente viável para os propósitos estudados.

Conforme Andrade (2014) novas aplicações dos rejeitos da mineração de ferro estão sendo cada vez mais sendo estudadas. Esses estudos analisam a viabilidade da aplicação deste rejeito em cimentos, fabricação de concretos, argamassas e cerâmicas e utilização em obras de pavimentação.

Os rejeitos gerados nas atividades de mineração e beneficiamento de ardósia, misturados com argilas com alto poder de agregação podem ser aplicados de maneira satisfatória na fabricação de cerâmica vermelha para a construção civil, exemplificando outro tipo de aplicação para rejeitos provenientes da mineração (OLIVEIRA; RODRIGUES, 2001).

2.3 IMPORTÂNCIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL COMO RECEPTORA DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A construção civil é considerada a maior consumidora de recursos naturais extraídos do mundo. Segundo a Fundação Dom Cabral (FDC, 2011), este macro-setor é responsável pelo consumo de 75% destes recursos, sendo esses valores em nível mundial. Esse consumo é

variante com alguns fatores, dentre os quais se destacam são a taxa de resíduos gerados, a necessidade de manutenção, vida útil das estruturas construídas e a tecnologia empregada.

O produto mais consumido na construção civil é o cimento. Conforme dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2015) no ano de 2014 a produção mundial de cimento totalizou 4.180 Mt. O Brasil, maior produtor da América Latina, produziu neste ano de 2014 o equivalente a 71 Mt, que corresponde a 1,7% de toda produção mundial. A produção de cimento de cada região brasileira pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção de cimento no Brasil em 2014.

Região	Produção de cimento (em Mt)
Sudeste	33,58
Nordeste	15,19
Sul	10,37
Centro-Oeste	8,66
Norte	3,20

Fonte: Adaptado Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2015).

Entretanto, em determinados lugares, principalmente, nos arredores das grandes cidades, as matérias primas que alimentam a construção civil, começam a ficar escassas, e buscar esses materiais em uma grande distância, eleva o seu custo. Em consequência da escassez dos materiais e dos impactos ambientais causados pela construção civil progressivamente, estão sendo realizados estudos de reutilização de resíduos, inclusive rejeitos de mineração, para fabricação de produtos necessários para essa atividade (SILVEIRA, 2015).

O uso de resíduos minerais na produção de materiais de construção é muito vantajoso. De acordo com Menezes *et al.* (2002), as maiores vantagens da utilização destes resíduos são: a abundância, especialmente nas regiões que concentram empresas mineradoras e de beneficiamento mineral; a variedade de matérias primas e a possibilidade de redução dos custos de produção.

2.4 MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Segundo Cincotto e Helene (1994) o cimento Portland é um aglomerante hidráulico fabricado pela moagem do clínquer (nódulos de material sinterizado, produzido quando uma mistura de matérias-primas de composição pré-determinada é aquecida a altas temperaturas), que é constituído principalmente por silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição.

Os principais constituintes do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) determinada proporção de magnésia (MgO) e uma pequena percentagem de anidrido sulfúrico (SO_3), que é incorporado após a calcinação a fim de retardar o tempo de pega do cimento.

A percentagem de cal no cimento Portland varia entre 58% a 67%, e quando este constituinte está totalmente combinado, as propriedades mecânicas do cimento aumentam na medida em que o teor de cal se eleva. Às vezes, devido à imperfeição no processo de fabricação, pode existir certa quantidade de cal livre que, quando se encontra acima de determinados limites, pode afetar a estabilidade de volume dos concretos e argamassas.

A sílica é proveniente das argilas utilizadas como matéria-prima, a sua combinação com a cal fornece os compostos mais relevantes do cimento Portland, e o teor presente neste material é de 18% a 27%. O teor de alumina corresponde a 4% a 10% e, assim como a sílica, também procede da argila. A alumina deve existir em pequena quantidade, porque causa a redução da resistência aos sulfatos, além de acelerar o tempo de pega do aglomerante. Entretanto, não pode ser dispensada, uma vez que, agindo como fundente, facilita o desenvolvimento das reações que possibilitam a formação do clínquer. Já o óxido de ferro aparece em uma percentagem de 2% a 5%, e é encontrado combinado com outros óxidos.

A magnésia, oriunda do carbonato de magnésio, ocorre em teores baixos que variam entre 0,8% a 5%, em excesso, também acomete a estabilidade dos concretos e argamassas. O anidrido sulfúrico deve estar presente em uma percentagem de até 3%, caso contrário, pode formar sulfoaluminato de cálcio, o que é indesejável (SILVA, 1991). A Tabela 2 resume a composição química do cimento Portland e as respectivas percentagens.

Tabela 2- Composição química do cimento Portland.

Designação	Composição química	Porcentagem (%)
Cal (óxido de cálcio)	CaO	58,00 a 67,00
Sílica (dióxido de silício)	SiO ₂	18,00 a 27,00
Alumina (óxido de alumínio)	Al ₂ O ₃	4,00 a 10,00
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	2,00 a 5,00
Magnésia	MgO	0,80 a 5,00
Anidrido Sulfúrico	SO ₃	0,82 a 3,00

Fonte: Adaptado Silva (1991).

2.4.1 FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Conforme Oliveira (2000), a produção do cimento Portland é realizada em uma sequência de operações, dentre as quais se destacam a extração da matéria-prima, britagem, moagem e homogeneização, queima, moagem do clínquer e expedição. A Figura 5 apresenta as operações de produção do cimento Portland.

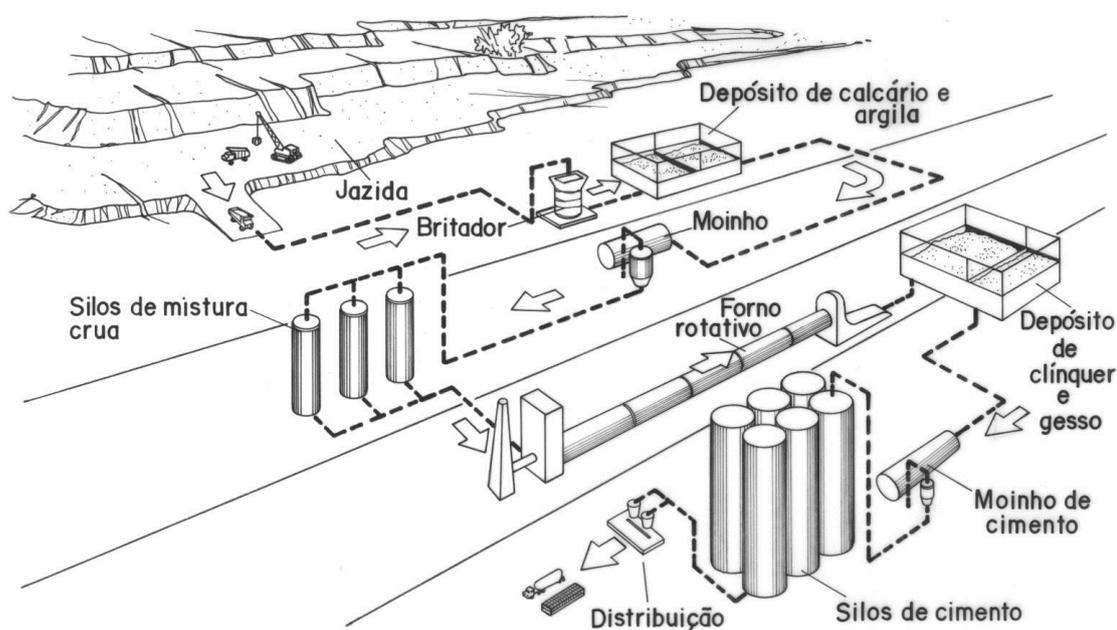


Figura 5 - Produção do cimento Portland.

Fonte: Resdil.

O calcário e a argila são as matérias-primas indispensáveis para a fabricação do clínquer, é utilizado em uma proporção de 75% e 25%, respectivamente. Alguns aditivos corretivos, como minério de ferro, areia e bauxita, também são usados. Depois de lavrado, o calcário, passa por etapa de britagem e armazenamento, que antecede a pré-homogeneização junto com a argila e os demais aditivos. Essas matérias-primas são dosadas nas quantidades exatas, quando então são moídas e homogeneizadas até se obter um material fino e de concentração homogênea.

A transformação deste material, que é físico-química, passa por quatro estágios: pré-calcinação, calcinação, clínquerização e resfriamento. A pré-calcinação ocorre em fornos que reaproveitam os gases quentes da saída do forno para aquecer o material, sendo que este alcança uma temperatura de aproximadamente 800°C. Neste ponto inicia-se a calcinação, passando para o forno rotativo, onde se localiza o maçarico principal, o qual atinge 2000°C. Desta forma, o material atinge uma temperatura de até 1450°C, fundindo-se parcialmente e resultando no clínquer.

Este clínquer é resfriado, e moído juntamente com gesso, e dependendo do tipo de cimento que se deseja produzir, são acrescentados alguns materiais como escória siderúrgica, cinzas volantes, pozolanas e fíler calcário, a fim de formar o cimento Portland. Por fim, o produto final é ensacado ou encaminhado a granel para os veículos de transporte (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2012).

A fabricação do clínquer para o cimento Portland pode ser dividida em quatro tipos de processos: via úmida, via semiúmida, via seca e via semisseca. O fluxograma de cada tipo de processo de fabricação está ilustrado na Figura 6. A escolha do processo é dependente da umidade das matérias-primas, entretanto, os fornos utilizados para o processo via seca garantem maior eficiência energética, economia de combustíveis e menor emissão de poluentes.

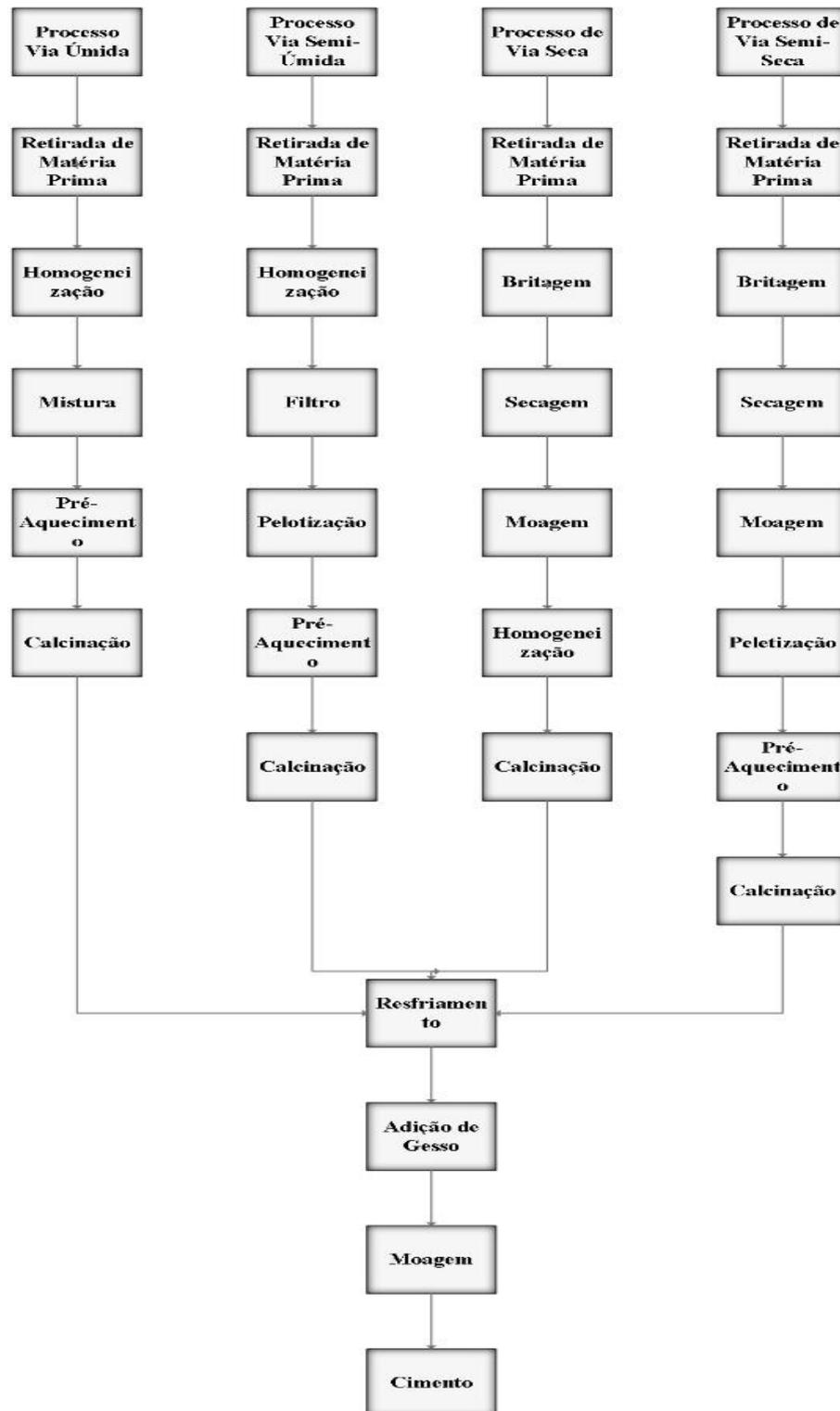


Figura 6 - Fluxograma dos processos de fabricação do cimento Portland.
Fonte: Adaptado Silva (1991).

2.4.2 TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), no Brasil existem diversos tipos de cimento Portland que diferem entre, essencialmente, em relação a sua composição. Os principais tipos consumidos no mercado são o cimento Portland comum, cimento Portland composto, cimento Portland de alto-forno e o cimento Portland pozolânico. Estes tipos de cimento serão detalhados a seguir. Dentre os cimentos menos consumidos, se destacam o cimento Portland de alta resistência inicial, o cimento Portland resistente aos sulfatos, o cimento Portland branco, o cimento Portland de baixo calor de hidratação e o cimento para poços petrolíferos. O baixo consumo desses últimos tipos de cimento Portland é justificado pelas suas características especiais de aplicação e também pela menor oferta.

Todos os tipos de cimento Portland citados são regidos por normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A ABNT possui escritórios ou representantes espalhados pelo país, nos quais essas normas podem ser adquiridas.

2.4.2.1 CIMENTO PORTLAND COMUM (CP I)

Este tipo de cimento é chamado de cimento Portland comum (CP I) devido ao fato de não possuir nenhum tipo aditivo além do gesso, que também está presente nos demais tipos de cimento Portland (são adicionados aproximadamente 3% de gesso). O gesso tem a função de retardar o início de pega do cimento para que tenha tempo de ser aplicado (PEREIRA *ET AL.*, 2013).

O CP I foi o primeiro cimento lançado no Brasil e é o mais básico. De acordo com Pereira (2012) esse cimento tem aplicação em serviços de construção em geral, quando não são exigidas propriedades especiais do cimento. Pode ser usado em construções de concreto em geral, quando não há exposição a sulfatos do solo ou de águas subterrâneas. Toda a produção de cimento Portland comum é voltada para a indústria.

A ABNT NBR 5732 é a norma que trata o cimento Portland comum. Nesta norma são estabelecidas 3 classes de resistência: 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa (ABNT NBR 5732/1991).

2.4.2.2 CIMENTO PORTLAND COMPOSTO (CP II)

O cimento Portland composto (CP II) possui composição intermediária entre os cimentos Portland comuns e os cimentos Portland com adições (alto-forno e pozolânico). Segundo a ABNT NBR 11578 (1991) esse cimento é designado pelas seguintes siglas:

- CP II-E: Cimento Portland composto com escória;
- CP II-Z: Cimento Portland composto com pozolana;
- CP II-F: Cimento Portland composto com fíler.

O cimento Portland composto gera calor em uma velocidade menor se comparado com o cimento Portland comum. Desta forma, é mais indicado em lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume de concretagem e a pequena superfície diminuem a capacidade de resfriamento do material. Além disso, apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos presentes no solo. A Tabela 3 contém os teores dos componentes dos cimentos Portland comum e composto.

Tabela 3 - Teores dos componentes dos cimentos Portland comum e composto.

Sigla	Classe de resistência	Clínquer + sulfatos de cálcio	Componentes (% em massa)		
			Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CPI	25	100		0	
	32				
	40				
CPI-S	25	95-99		5-1	
	32				
	40				
CP II-E	25	56-94	34-6	-	10-0
	32				
	40				
CP II-Z	25	76-94	-	14-6	10-0
	32				
	40				
CP II-F	25	90-94	-	-	10-6
	32				
	40				

Fonte: Adaptado ABNT NBR 11578/1991 e ABNT 5732/1991.

2.4.2.3 CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO (CP III)

Conforme Galhardo (2014), o cimento Portland de alto forno (CP III) apresenta teor de escória entre 35% e 70% em massa. Esse teor proporciona para o cimento algumas propriedades, tais como, baixo calor de hidratação e maior impermeabilidade e durabilidade.

Pode ser aplicado tanto em obras de grande porte e agressividade (barragens, fundações de maquinário, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para a condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, pista de aeroporto, etc.) quanto em argamassas de assentamento, estruturas de concreto simples, armado entre outros. A Tabela 4 contém a composição deste tipo de cimento.

Tabela 4 - Teores dos componentes dos cimentos Portland de alto forno.

Sigla	Classe de resistência (MPa)	Componentes (% em massa)		
		Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material carbonático
CP III	25	65-25	35-70	0-5
	32			
	40			

Fonte: Adaptado ABNT 5735/1991.

2.4.2.4 CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO

O cimento Portland pozolânico CP IV que possui composição de acordo com a Tabela 5, é especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. O concreto feito com este produto se torna mais impermeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão superior à do concreto feito com cimento Portland comum.

Tabela 5 - Teores dos componentes dos cimentos Portland pozolânico.

Sigla	Classe de resistência (MPa)	Componentes (% em massa)		
		Clínquer + sulfatos de cálcio	Material pozolânico	Material carbonático
CP IV	25	85-45	15-50	0-5
	32			

Fonte: Adaptado ABNT 5736/1991.

Entretanto, a utilização de pozolanas junto ao cimento Portland também apresenta algumas desvantagens. A exigência do uso de aditivos redutores de água no cimento Portland é um exemplo destas desvantagens. O uso destes aditivos redutores de água é consequência do aumento da demanda de água nas misturas e a necessidade de cura adequada para que a reação pozolânica ocorra com maior eficiência possível. A substituição de parte do cimento Portland por pozolana acarreta em concretos com menores resistências iniciais, visto que a reação pozolânica ocorre de maneira lenta.

2.5 ADIÇÕES MINERAIS NOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Os compósitos cimentícios podem receber adições minerais, que normalmente são materiais silicosos finamente moídos, acrescentados ao concreto em quantidades variadas, desde 6 até 70% da massa do material cimentício total. Ainda que as pozolanas naturais em estado bruto ou após a ativação térmica sejam empregadas em alguns lugares do mundo, devido a razões econômicas, é crescente o uso de subprodutos industriais como fonte primária de adições minerais (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Essas adições são usadas em substituição parcial do cimento Portland com o objetivo de reduzir custos, melhorar a trabalhabilidade e coesão do concreto fresco, aumentar a resistência mecânica do concreto endurecido, aumentar a resistência à abrasão e resistividade elétrica e contribuir com a redução de emissão de dióxido de carbono na atmosfera.

2.6 MATERIAIS POZOLÂNICOS

Materiais pozolânicos são definidos como sendo substâncias, inorgânicas, naturais ou artificiais, silicosas ou silicoaluminosas que, sozinhas possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, entretanto, quando finamente divididos e na presença de a água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (ABNT NBR 12653/2012).

No Brasil, o emprego mais comum das pozolanas é no processo de fabricação de cimento, gerando dessa forma, os conhecidos cimentos pozolânicos e/ou com cimentos com adições. Contudo, esse material ainda pode ser empregado em substituições em uma parte do clínquer ou ainda na produção de argamassas e concretos.

De acordo com Sebastiany (2014), em relação à origem, os materiais pozolânicos se distinguem em dois grupos principais: pozolanas naturais e pozolanas artificiais. A Figura 7 contém um fluxograma de classificação desse material.

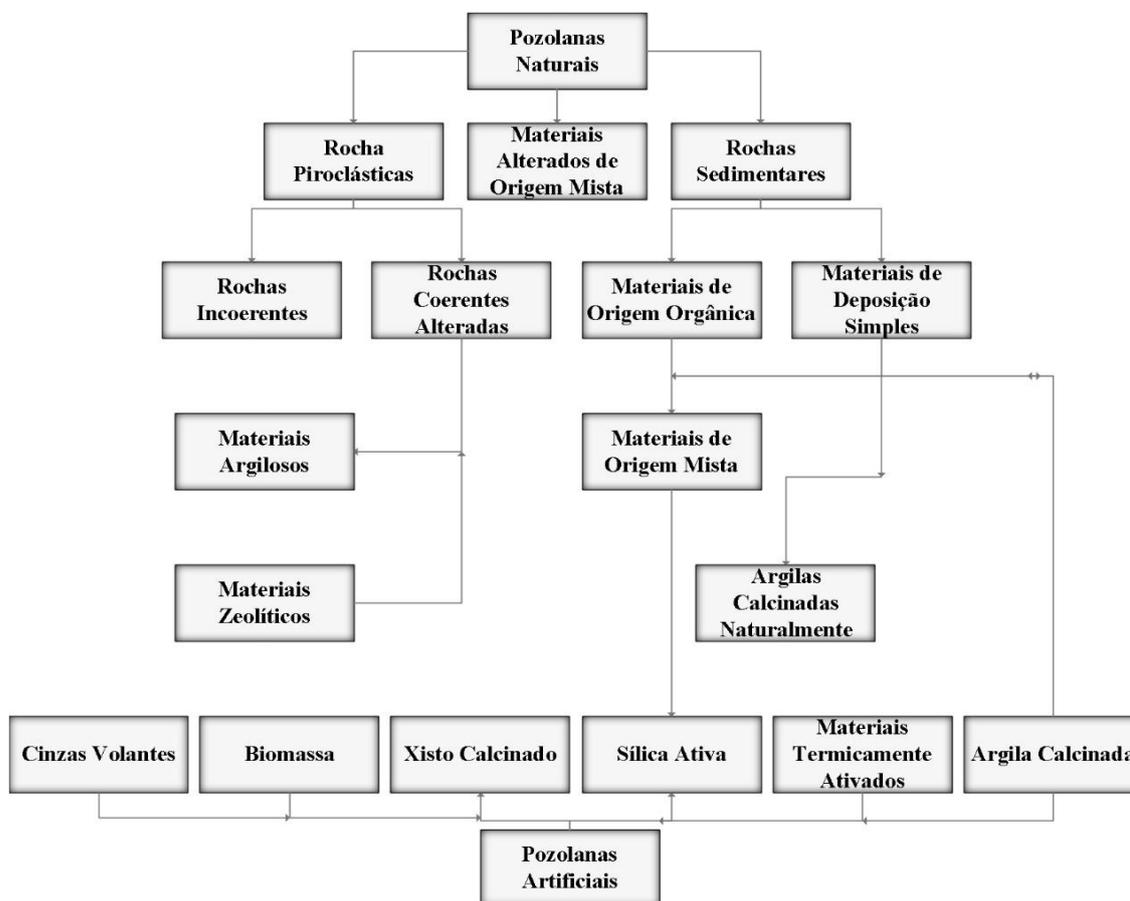


Figura 7 - Fluxograma de classificação das pozolanas.

Fonte: Adaptado Sebastiany (2014).

As pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica ou sedimentar que passam por processo de britagem, moagem, classificação, e que, em geral, são ativados termicamente, uma vez que, apresentam impurezas que diminuem a sua atividade pozolânica. São exemplos de pozolanas naturais: tufo vulcânico, terras diatomáceas e argilas calcinadas. A composição química deste tipo de pozolana é variável, ainda que consista basicamente de sílica, alumínio e óxido de ferro (TASHIMA, 2006).

As pozolanas ditas como artificiais foram desenvolvidas com o objetivo de buscar fontes alternativas, visto que o processamento das pozolanas naturais consome grande quantidade de energia. Define pozolanas artificiais como sendo resíduos ou subprodutos agroindustriais provenientes de diversas origens e que possuem diferentes características, mas que apresentam em comum a atividade pozolânica.

Consoante a Barros (2012), dentre as pozolanas artificiais mais usadas na construção civil pode-se destacar as cinzas volantes, as escórias de alto-forno e sílica ativadas, que são apresentadas na Figura 8.



Figura 8 - Exemplos de pozolanas artificiais. a) Cinzas volantes. b) Escórias de alto-forno. c) Sílica ativa.
 FONTE: Souza e Mozzer (2010); Costa *et al.* (2017).

2.6.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS POZOLÂNICOS

A ABNT NBR 12653/2012 divide os materiais pozolânicos em três classes: Classe N, Classe C; Classe E. A Tabela 6 contém detalhes dessa classificação.

Tabela 6 - Classificação dos materiais pozolânicos.

Classificação	Definição
Classe N	Pozolanas naturais e artificiais que atende aos requisitos aplicáveis a ABNT NBR 12653/2012. Materiais vulcânicos de petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
Classe C	Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas, que obedecem aos requisitos aplicáveis na ABNT NBR 12653/2012.
Classe E	Qualquer pozolana cujos requisitos se distinguem das classes anteriores, conforme estabelecido na ABNT NBR 12653/2012.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 12653/2012.

A mesma norma estabelece aspectos destes materiais como embalagem e marcação, transporte, armazenamento, inspeção, além de requisitos químicos e físicos, sendo que estes dois últimos são apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Todos os materiais pozolânicos devem estar em conformidades em relação a todos esses aspectos e requisitos. Caso o material não atenda a qualquer um dos requisitos da NBR 12653/2012, este não é considerado como material pozolânico.

Tabela 7 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	≥ 70,0	≥ 70,0	≥ 50,0
SO ₃ (%)	≤ 4,0	≤ 5,0	≤ 5,0
Teor de umidade (%)	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0
Perda ao fogo (%)	≤ 10,0	≤ 6,0	≤ 6,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5

Fonte: ABNT 12653/2012.

Tabela 8 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos.

Propriedades*	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira com abertura de malha de 45 µm (%)	≤ 34	≤ 34	≤ 34
Índice de atividade pozolânica			
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (%)	≥ 75	≥ 75	≥ 75
- com a cal aos 7 dias (MPa)	≥ 6	≥ 6	≥ 6
- água requerida (%)	≤ 115	≤ 110	≤ 110

* Critérios de uniformidade: a massa específica e a finura de amostras individuais não podem ter variação, em relação à média estabelecida em dez ensaios consecutivos, superior a no máximo 5%, em todos os casos.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 12653/2012.

A depender da necessidade do comprador, este pode ainda pode exigir algumas especificações. A Tabela 9 apresenta os limites para ensaios facultativos.

Tabela 9 - Limites para ensaios facultativos.

Propriedades*	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Fator múltiplo calculado como o produto da perda ao fogo pelo teor retido no peneiramento úmido pela peneira com abertura de malha de 45 µm	-	≤ 255,00	-
Aumento na retração por secagem de barras aos 28 dias (%)	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05
Reatividade com álcalis do cimento			
- redução da expansão da argamassa aos 14 dias (%);	≥ 75,00	≥ 75,00	≥ 75,00
- expansão da argamassa aos 14 dias (%).	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02

Fonte: Adaptado ABNT NBR 12653/2012.

A ABNT NBR 12653/2012 também define os ensaios e as normas que contém nas metodologias devem ser seguidas para a realização destes. A relação de ensaios e normas pode ser observada na Tabela 10.

Tabela 10- Ensaios para determinação de propriedades dos materiais pozolânicos.

Ensaio	Norma
Análise química	ABNT NBR NM 22
Teor de umidade	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis	ABNT NBR NM 25
Índice de atividade pozolânica	ABNT NBR 5752
Retração por secagem	ABNT NBR 12650
Reatividade com álcalis do cimento	ABNT NBR 12651
Massa específica	ABNT NBR NM 23
Finura	ABNT NBR 9202

Fonte: Adaptado ABNT NBR 12653/2012.

2.6.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA E REAÇÃO POZOLÂNICA

A pozolana quando adicionada a uma matriz cimentícia, reage com o hidróxido de cálcio, formado durante o processo de hidratação do cimento, e gera produtos resistentes de hidratação, como por exemplo, o silicato de cálcio, aluminato de cálcio hidratado e/ou sílico-aluminato de cálcio hidratado (TASHIMA, 2006).

Segundo Massazza (1998), a atividade pozolânica abrange todas as reações que envolvem os componentes ativos das pozolanas, hidróxido de cálcio e água. Geralmente, está relacionada com a quantidade máxima de hidróxido de cálcio que pode reagir com a pozolana e a taxa com que tal reação acontece. A capacidade dos materiais pozolânicos de reagirem com o hidróxido de cálcio, formando compostos de propriedades aglomerantes, está associada ao fato de o silício e óxidos presentes na composição destes materiais, se encontrarem em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente.

A reação pozolânica é desencadeada devido à reatividade da sílica e da alumina ao hidróxido de cálcio, à fraqueza e à instabilidade de suas ligações estruturais no material original (MALQUORI, 1960). Esta reação é caracterizada pelo consumo lento do hidróxido de cálcio livre e pelo material pozolânico.

Conforme Cordeiro (2009), as partículas finas da pozolana e outros produtos da reação pozolânica (cálcio aluminato hidratados) atuam como fíler, reduzindo a porosidade da

estrutura resultante. Os efeitos pozolânicos combinados com os fíler decorrentes da reação pozolânica representam uma contribuição importante para a resistência e durabilidade da pasta endurecida em relação a meios ácidos.

O potencial pozolânico, ou pozolanicidade, é definido como sendo a capacidade de um material pozolânico reagir com a cal, na presença de água, em temperaturas normais, para formar compostos de cimento (ZHANG *ET AL.*, 2011). Entre as principais propriedades dos materiais que interferem no potencial pozolânicos estão: a reatividade, a porcentagem de SiO₂ presentes nas fases ativas, razão cal/pozolana presente na mistura, superfície específica e temperatura.

A reatividade do material está relacionada com as fases ativas (grau de amorfismo). A pozolanicidade é inversamente proporcional à quantidade de fases cristalinas do material. A porcentagem de sílica influencia no porcentual de cal consumida durante a reação pozolânica. A quantidade de cal consumida aumenta na medida em que a razão cal/pozolana diminui. A velocidade da reação pozolânica está ligada à superfície específica, quanto maior a superfície específica do material, mais rápida será esta reação. A temperatura implica em alterações na velocidade de reação, porém essa relação não apresenta linearidade.

A importância técnica dos cimentos pozolânicos está correlacionada, principalmente, a três aspectos da reação pozolânica. O primeiro aspecto consiste em uma reação lenta que ocorre com baixa liberação de calor de hidratação, acarretando em menos problemas de fissuração (MEHTA; MONTEIRO, 1994). O efeito da substituição parcial do cimento Portland por uma pozolana natural sobre o calor de hidratação deste tipo de cimento é ilustrado na Figura 9. Percebe-se que na medida em que o consumo de pozolana aumenta, o calor de hidratação diminui.

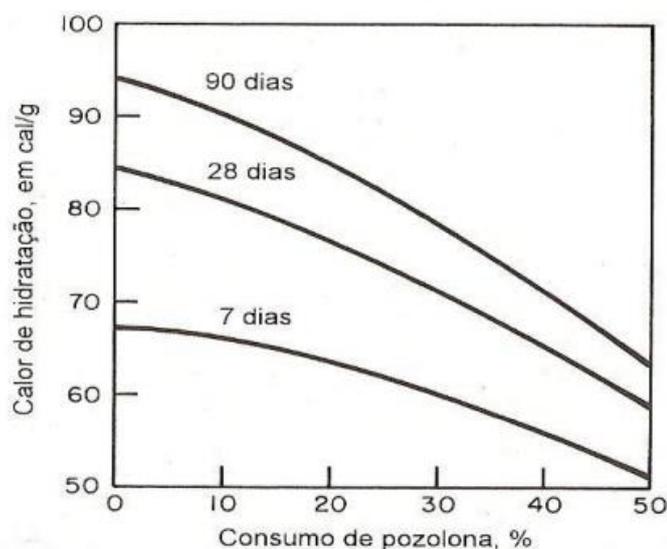


Figura 9 - Efeito da substituição parcial do cimento Portland por uma pozolana natural sobre o calor de hidratação do cimento Portland.

Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

O segundo aspecto é o fato que a hidratação do cimento Portland libera grande quantidade de hidróxido de cálcio, sendo que este contribui pouco para a resistência da pasta de cimento hidratada. Isso pode ocasionar problemas em relação à durabilidade, visto que esta pasta pode ser lixiviada facilmente pela água, o que gera maior vulnerabilidade ao ataque de agentes nocivos. Entretanto, ao invés de produzir, a reação pozolânica consome o hidróxido de cálcio, contribuindo para o aumento da durabilidade da pasta endurecida (CORDEIRO, 2009).

O terceiro e último aspecto está relacionado com a distribuição de tamanho dos poros dos cimentos pozolânicos hidratados. Os produtos da reação apresentam eficiência no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando assim a resistência e impermeabilidade do sistema.

2.6.3 VERIFICAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA

Em consequência do surgimento de novos materiais com potencial pozolânico, surgiu a necessidade de estabelecer uma medida que demonstrasse a eficácia destes materiais quando combinados às matrizes cimentícias. Desta maneira, adotou-se o conceito de atividade pozolânica, que segundo Cordeiro (2009) é um parâmetro que possibilita analisar a reatividade de um determinado material. Assim, passou-se a comparar o desempenho pozolânico dos materiais.

Conforme Netto (2006), a determinação dos índices da atividade pozolânica é processada em duas etapas, a pré-qualificação pozolânica e a confirmação da atividade

pozolânica. A primeira é realizada através de análises químicas, petrográficas e as difrações de raios-X. A confirmação da atividade pozolânica depende de ensaios de preparação do material (finura por peneiramento, massa específica e área específica) para, posteriormente, ser feito o teste de atividade pozolânica, mediante reação química com a cal ou com o cimento do material em estudo. (MONTANHEIRO *ET AL.*, 2003). Esses ensaios estão estabelecidos pela ABNT.

O índice de atividade pozolânica pode ser determinado através de vários tipos de métodos. De acordo com Santos (2006), os requisitos que um método de ensaio deve apresentar são: capacidade de diferenciar os materiais pozolânicos e os materiais não pozolânicos, fornecer informações acerca do grau de atividade pozolânica a mistura, fornecer informações sobre o desenvolvimento da resistência da mistura e possibilitar a avaliação dos resultados em um curto espaço de tempo.

ABNT NBR 5751 designa o método para determinar a atividade pozolânica por meio do índice de atividade com a cal. Já, a ABNT NBR 5752 define o método de ensaio para a determinação da atividade pozolânica com o cimento Portland aos 28 dias. Neste método o índice de atividade pozolânica é a razão entre a resistência à compressão axial média da argamassa com a pozolana e a resistência à compressão axial média da argamassa de controle, em MPa. É expressa em porcentagem, sendo que a ABNT NBR 12653/2012 requer valores iguais ou superiores a 75%. O ensaio realizado com cimento apresenta algumas limitações, uma vez que os resultados podem sofrer influência da composição do cimento utilizado e da variação da relação água/aglomerante (NETTO, 2006).

Outro método utilizado para essa determinação é o método de Chapelle Modificado. Em 1958, Chapelle desenvolveu o método, que recebeu o seu nome, objetivando avaliar a atividade pozolânica de um material, determinando-se a quantidade de hidróxido de cálcio não reagido com o material ensaiado, obtido por titulação. Assim, quanto menor o teor de hidróxido de cálcio não reagido, maior a atividade pozolânica do material. Esse método sofreu algumas alterações em relação à temperatura e ao tempo de ensaio, além de ser adicionada uma agitação constante, passando o ensaio a ser chamado de Chapelle modificado (SEBASTIANY, 2014).

Um quarto método de determinação da atividade pozolânica é o método de Fratini. Fundamenta-se na fixação do hidróxido de cálcio pelas pozolanas e consiste em um método químico, aplicado, restritamente, aos cimentos Portland pozolânicos. Os resultados obtidos devem ser analisados com cuidado, visto que o processo químico de fixação de cal pela pozolana não garante um desempenho mecânico satisfatório do cimento (ZAMPIERI, 1989).

Outra maneira de determinar a atividade pozolânica é através do Método de Luxàn. Segundo Silva (2016), o método relaciona a reatividade do material com a variação da condutividade elétrica de uma solução saturada de hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Quanto maior a diferença de condutividade iônica da solução após a mistura de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, maior a reatividade do material. Luxàn *et al.* (1989) classificam os materiais pozolânicos em três grupos de acordo com o respectivo índice de atividade pozolânica. A Tabela 11 traz essa classificação.

Tabela 11 - Classificação da Pozolana pela Condutividade Elétrica.

Classificação	Varição da Condutividade elétrica (mS/cm)
Sem atividade pozolânica	< 0,4
Atividade pozolânica moderada	0,4 – 1,2
Alta atividade pozolânica	>1,2

Fonte: Adaptado Sebastiany (2014).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia empregada para a realização deste trabalho. Primeiramente, foram feitas a coleta e as preparações da amostra para as análises, testes e ensaios subsequentes. Em seguida foi feita a caracterização tecnológica do rejeito e, por fim, foi realizada a verificação da atividade pozolânica do material.

3.1 COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A amostra utilizada foi o material proveniente da barragem de rejeitos de uma mina de minério fosfático de origem sedimentar localizada na região de Patos de Minas-MG. A Figura 10 mostra a barragem da qual foi retirada a amostra de rejeito em análise. A amostra foi coletada e embalada em sacos plásticos pela empresa.



Figura 10 - Barragem de rejeito de minério fosfatado de origem sedimentar.

A preparação da amostra foi feita de acordo com os testes e ensaios realizados. Para a realização das análises granulométrica, química e mineralógica, bem como, dos testes de picnometria, perda ao fogo e verificação da atividade pozolânica foi necessário,

primeiramente, a secagem do rejeito. Para isso, o material foi transferido para uma bandeja e levado para uma estufa a 100°C, por um período de 24 horas. Na sequência, desaglomerou esse material, de modo que passasse em uma peneira com 0,42 mm de abertura. A homogeneização do material foi realizada através de uma pilha alongada (Figura 11). Coletaram-se 4 amostras, cada uma contendo aproximadamente 20 gramas. A primeira amostra foi encaminhada para o Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG para a realização das devidas análises, enquanto que as outras três amostras foram utilizadas para a determinação da densidade do rejeito, da perda ao fogo e para a verificação da atividade pozolânica.



Figura 11- Preparação de amostra para testes de picnometria, análises granulométrica, química e mineralógica. a) Rejeito em uma bandeja antes de ser levado para estufa. b) Rejeito sendo desaglomerado e passado por uma peneira de 0,42 mm de abertura. c) Homogeneização do rejeito por pilha alongada.

Para estabelecer a umidade, a amostra foi preparada de acordo com ABNT NBR 6457/1986. Essa preparação foi realizada sem secagem prévia, e consistiu em desmanchar os torrões deste material, evitando-se a quebra de grãos, e homogeneizá-lo. Por último, passou-se a amostra na peneira de 0,42 mm de abertura.

3.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO REJEITO

A caracterização tecnológica do rejeito foi realizada através da determinação da densidade por picnometria, análise granulométrica por difração a laser, análise química por Fluorescência de Raios-X (FRX), análise mineralógica por Difração de Raios-X, testes de umidade e ensaios de perda ao fogo.

3.2.1 DENSIDADE OU MASSA ESPECÍFICA

Para a determinação da massa específica do material utilizou-se a picnometria. Este método utiliza o picnômetro, que é um balão de vidro com fundo chato, equipado com uma

rolha do mesmo material, pela qual passa um canal capilar. O volume desse instrumento varia de 25 a 250 mL, dependendo da aplicação. No caso usou-se picnômetros com volume de 50 mL.

Primeiramente, foram pesados três picnômetros vazios, previamente limpos e secos, em estufa, a 100°C. Preencheu o fundo de cada um com o rejeito fosfático e pesou-se picnômetro + amostra. Os valores encontrados foram anotados. Posteriormente, preencheu os três picnômetros com água, e novamente, foi feita a pesagem, dos conjuntos picnômetro + amostra + água, os pesos encontrados também foram registrados.

Logo após, os picnômetros foram esvaziados e preenchidos com água. A massa dos picnômetros + água foi pesada e anotada. A Figura 12 ilustra mostra passo a passo da realização dos testes de picnometria.

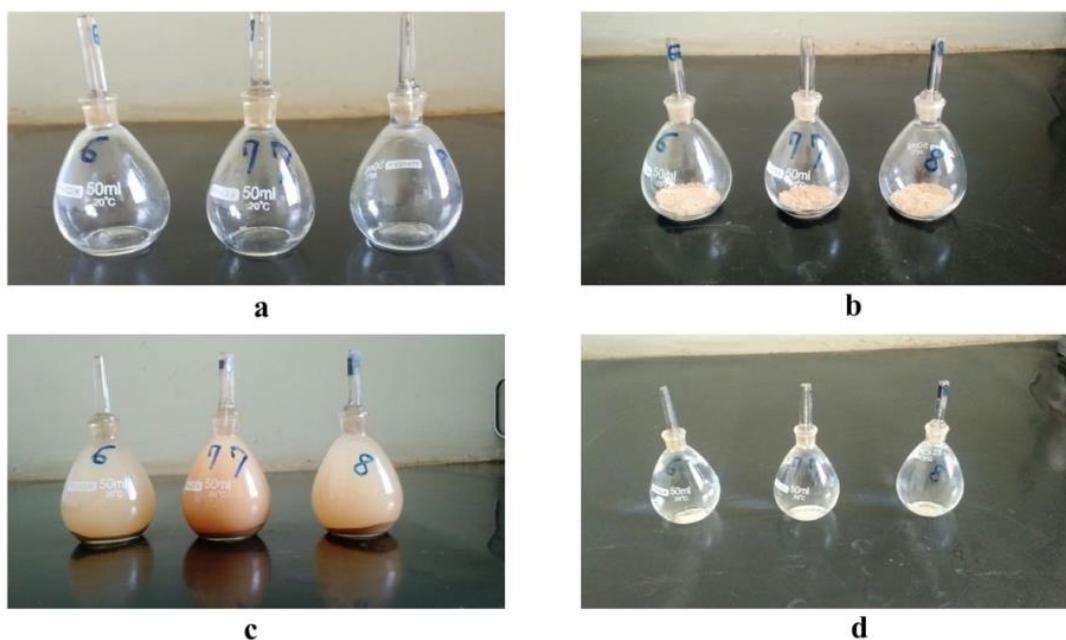


Figura 12- Picnometria. a) Picnômetros vazios. b) Picnômetros + amostra. c) Picnômetros + amostra + água. d) Picnômetros + água.

A partir da Equação 1 determinou-se a massa específica do rejeito fosfático. Em seguida, calculou-se a densidade média através da média aritmética dos valores encontrados.

$$ds = \frac{(A2) - (A1)}{(A4 + A2) - (A1 + A3)} \quad (1)$$

Onde:

ds = densidade dos sólidos;

A1 = massa do picnômetro;

A2 = massa do picnômetro + amostra;

A3 = massa do picnômetro + amostra + água;

A4 = massa do picnômetro + água.

3.2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR DIFRAÇÃO A LASER

A análise granulométrica do rejeito em estudo foi realizada utilizando o equipamento Cilas 1090 *Laser Particle Size Analyzer* (Figura 13), do Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, Campus I.



Figura 13- Cilas 1090 *Laser Particle Size Analyzer*.

3.2.3 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

A determinação do teor das espécies químicas do rejeito foi feita usando-se a técnica de Fluorescência de Raios-X. Essa técnica consiste em utilizar radiação de um feixe primário de raios X para excitar a amostra, que resulta na produção de uma radiação secundária conforme as características dos elementos químicos presentes. Por meio do ângulo de reflexão e das intensidades da radiação, é possível identificar e quantificar as espécies químicas (SANTOS, 2010).

A análise por fluorescência foi obtida pelo método do pó em um equipamento EDX-720 SHIMADZU, Figura 14, do Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG.



Figura 14 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por energia dispersiva.

3.2.4 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

De acordo com *Albers et al* (2002) nessa tipo de análise, um feixe de raios-X em um cristal. O feixe de raios-X interage com os átomos presentes, dando origem ao fenômeno de difração. A difração de raios-X sucede segundo a Lei de *Bragg*. Esta lei relaciona o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram, ambos são característicos para cada fase cristalina.

Utilizou-se o equipamento da marca SHIMADZU, modelo XRD-7000, do Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG (Figura 15).



Figura 15- Difratorômetro de Raios-X.

3.2.5 UMIDADE

A execução do ensaio para a determinação da umidade do material em estudo seguiu a NBR NM 24/2003: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Primeiro, pesou-se, em um cadinho de massa conhecida, 1,00 grama da amostra. Na sequência, o cadinho contendo a amostra foi transferido para uma estufa à temperatura de 105°C (Figura 16).



Figura 16 - Cadinhos com amostras na estufa à temperatura de 105°C.

Inicialmente, o conjunto, cadinho e amostra, permaneceu na estufa por um período de 30 minutos. O cadinho foi resfriado à temperatura ambiente em um dessecador, e depois foi pesada a massa do conjunto. Em seguida, voltou o material para a estufa, novamente a uma temperatura de 105°C, por 10 minutos. Depois, foi aferida a massa do material, que apresentou uma diferença menor do que 0,001 gramas entre as duas medições sucessivas, como é estabelecido pela norma.

O resultado do ensaio foi calculado pela média das determinações de umidade, sendo que esta é expressa pela Equação 2.

$$U = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

U = umidade da amostra, em porcentagem;

m_1 = massa da amostra antes da secagem, em gramas;

m_2 = massa da amostra após a secagem, em gramas.

3.2.6 PERDA AO FOGO

A perda ao fogo foi estabelecida pelo método de referência, segundo a norma ABNT NBR NM 18/2012. Primeiramente, foi pesado 1,000 gramas da amostra. Transferiu-se esse material para um cadinho de porcelana de massa conhecida. Calcinou-se em um forno mufla a uma temperatura de 1000°C por um período de 50 minutos. Encerrado esse tempo, o cadinho com o material foi colocado no dessecador até que atingiu a temperatura ambiente e depois a massa do conjunto foi pesada e anotada (Figura 17).



Figura 17- Teste de perda ao fogo. a) Cadinho de porcelana com amostra de rejeito de minério fosfatado. b) Cadinho com amostra na mufla à 1000°C. c) Cadinho com amostra no dessecador.

A perda ao fogo foi calculada por meio da Equação 3. Calculou-se a média aritmética dos valores encontrados.

$$PF = \frac{m_1 - m_2}{m} * 100 \quad (3)$$

Onde:

PF = perda ao fogo, em porcentagem;

m_1 = massa do cadinho + amostra, em gramas;

m_2 = massa do cadinho + amostra depois da calcinação, em gramas;

m_3 = massa da amostra utilizada no ensaio, em gramas.

3.3 VERIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA PELO MÉTODO DE LUXÀN

Para a verificação do índice de atividade pozolânica do rejeito de minério fosfatado foi utilizado o método de Luxàn. Os ensaios foram realizados em triplicata. Primeiramente, pesaram-se três amostras de 5,0 g do material estudado. Na sequência foram pesados 2 gramas de hidróxido de cálcio P.A. e 200 gramas de água destilada em um béquer de 1000 mL. O béquer contendo a água destilada foi transferido para o agitador magnético, onde colocado em agitação e aquecida até a temperatura de 40 °C (Figura 18).

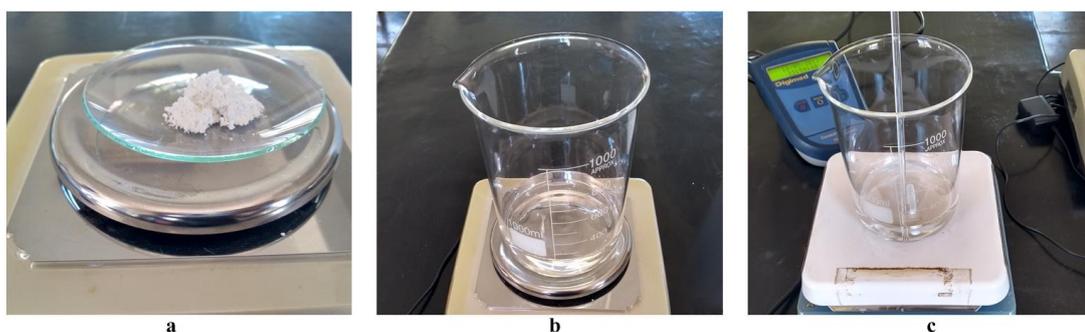


Figura 18- Método de Luxàn. a) 2 gramas de hidróxido de cálcio P.A.. b) 200 gramas de água destilada em um béquer de 1000 mL. c) Béquer com a água destilada em agitação e sendo aquecida até 40C.

Quando a temperatura de 40°C foi atingida, adicionou-se o hidróxido de cálcio. Uma vez que foi formada a solução supersaturada de hidróxido de cálcio, retirou o béquer do agitador magnético e acrescentou água destilada até que obteve 1000 gramas de solução (Figura 19).



Figura 19- Método de Luxàn. a) Solução supersaturada de hidróxido de cálcio P.A.. b) Adição até 1000 gramas de água de destilada a solução.

Com o auxílio de um filtro de papel em um suporte, filtrou 200 gramas de solução, que logo em seguida, foi levada para o agitador magnético e a temperatura foi mantida a 40°C. Introduziu-se o condutímetro a solução, medindo-se dessa forma, a condutividade inicial da mesma. Acrescentaram-se 5,0 gramas da amostra, mantendo a mistura em constante agitação, logo após foi medida a condutividade final da solução a 40°C (Figura 20).

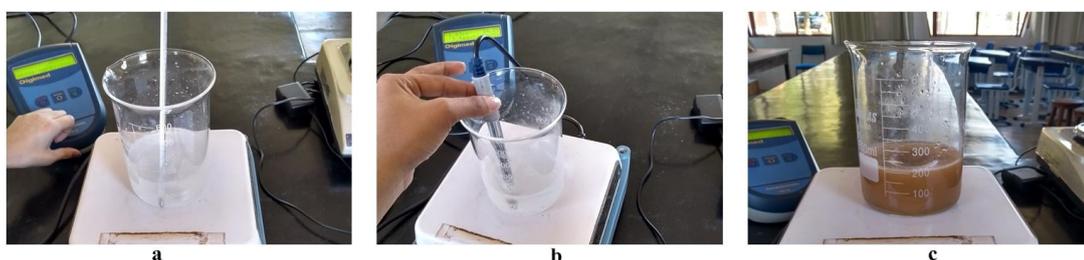


Figura 20- a) solução de hidróxido de cálcio P.A. filtrada. b) Medição da condutividade da solução filtrada. c) Adição de 5 gramas de amostra a solução para posterior medição da condutividade.

O condutímetro utilizado informa a condutividade das soluções em mS/cm a 25°C. Como as medidas foram aferidas com a solução a 40°C, de acordo com Sebastiany (2014), é necessário converter os resultados obtidos, através da Equação 4.

$$\text{Cond. elétrica a } 40^{\circ}\text{C} = \text{Cond. elétrica a } 25^{\circ}\text{C} \times [1 + 0,019(40-25)] \quad (4)$$

A variação da condutividade, que é o parâmetro analisado para determinar se um material apresenta índice de atividade pozolânica, é dada pela Equação 5:

$$\Delta \text{ Cond. elétrica a } 40^{\circ}\text{C} = \text{Cond. elétrica a } 40^{\circ}\text{C}_{\text{inicial}} - \text{Cond. elétrica a } 40^{\circ}\text{C}_{\text{final}} \quad (5)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na realização dos ensaios e testes. Inicialmente serão expostos os resultados da caracterização tecnológica do rejeito de minério fosfatado e, posteriormente, os resultados da verificação do índice de atividade pozolânica.

4.1 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Os resultados da caracterização tecnológica que consistiu na determinação da massa específica, análise granulométrica por difração a laser, análise química por FRX, testes de umidade e perda ao fogo estão apresentados nos próximos tópicos.

4.1.1 DENSIDADE OU MASSA ESPECÍFICA

Os resultados obtidos da picnometria, que foi o método utilizado para determinar a densidade do rejeito, estão apresentados na Tabela 12. Observa-se que a média das densidades encontradas foi equivalente a $2,72 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 12- Densidade do rejeito por picnometria

Picnometria			
	P1	P2	P3
Picnômetro vazio (g)	32,45	30,83	30,29
Picnômetro+ amostra (g)	34,08	32,13	32,78
Picnômetro +amostra +água (g)	84,03	81,46	82,58
Picnômetro + água (g)	83,11	80,73	81,26
Densidade da amostra (g/cm^3)	2,30	2,28	2,13
Média densidade (g/cm^3)			
2,23			
Desvio Padrão (g/cm^3)			
0,09			

4.1.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR DIFRAÇÃO A LASER

A Figura 21 apresenta o resultado da análise granulométrica por difração a laser feita utilizando o equipamento Cilas 1090 Laser Particle Size Analyzer.

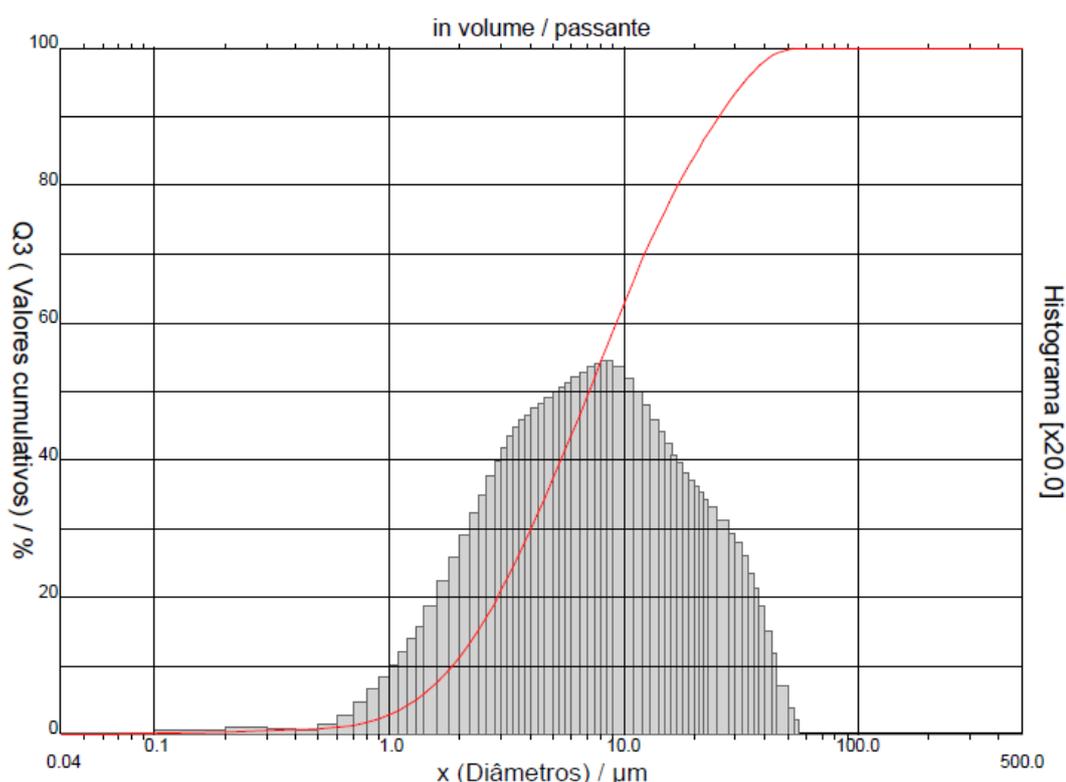


Figura 21-Distribuição Granulométrica do rejeito.

Analisando a Figura 21 constata-se que a amostra apresenta partículas cuja granulometria encontra-se na faixa entre 0,04 μm e 53,00 μm . Sendo assim, de acordo com Somasundaran (1980) o material é constituído por partículas finas (partículas que apresentam diâmetro entre 10 e 100 μm), ultrafinas (partículas com diâmetro entre 1 e 10 μm) e coloides (partículas que possuem diâmetro menor que 1 μm).

Observa-se que aproximadamente 63% das partículas do rejeito possui granulometria abaixo de 10 μm . Ainda foi possível identificar alguns valores importantes para a interpretação da distribuição granulométrica, sendo eles:

- Diâmetro mínimo de partícula: 0,04 μm
- Diâmetro a 10% de material passante: 1,86 μm
- Diâmetro a 50% de material passante: 7,13 μm
- Diâmetro a 90% de material passante: 25,51 μm

- Diâmetro máximo de partícula: 56,00 μm
- Diâmetro médio do rejeito: 10,62 μm

Devido ao fato do rejeito estudado ser constituído de partículas finas, ultrafinas e coloides, levanta-se a possibilidade desse material ser produto de um processo de deslamagem.

Baseando-se na distribuição granulométrica, é possível fazer a análise de um requisito físico para aplicação do rejeito de minério fosfatado como material pozolânico. De acordo com a Tabela 8, para essa aplicação o material precisa apresentar no máximo 15% das partículas acima de 45 μm . A porcentagem do rejeito que se encontra acima desse tamanho é equivalente a 0,74%, satisfazendo, dessa forma, um dos requisitos físicos para aplicação como material pozolânico.

4.1.3 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIO-X

A composição química do rejeito estudado neste trabalho pode ser vista nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13- Análise química elementar da amostra de rejeito.

Elemento	Porcentagem (%)
Si	30,336
Ca	27,323
Fe	12,869
Al	10,769
P	8,720
K	6,648
Ti	1,303
Sr	0,711
Ba	0,621
Mg	0,427
Mn	0,174
Rb	0,048
Zn	0,029
Y	0,022

A Tabela 13 apresenta a análise química elementar da amostra. Observa-se que o elemento com maior porcentagem é o silício (30,336%), seguido pelo cálcio (27,323%), ferro (12,869%) e alumínio (10,769%). Os elementos que apresentaram menores porcentagens

foram: rubídio (0,048%), zinco (0,029%) e ítrio (0,022%). A Tabela 14 contém a análise química quanto aos óxidos presentes na amostra.

Tabela 14- Análise química de óxidos.

Óxido	Porcentagem (%)
SiO ₂	41,085
CaO	19,005
Al ₂ O ₃	13,986
P ₂ O ₅	11,366
Fe ₂ O ₃	8,029
K ₂ O	4,228
TiO ₂	0,990
MgO	0,510
SrO	0,339
BaO	0,316
MnO	0,099
Rb ₂ O	0,021
ZnO	0,015
Y ₂ O ₃	0,011

Analisando a Tabela 14, nota-se uma elevada porcentagem dos óxidos SiO₂ (41,085%), Al₂O₃ (13,986%) e Fe₂O₃ (8,029%), sendo que o somatório desses valores equivale a 63,100%. O valor elevado desta soma abre a possibilidade de aplicação desse rejeito como material pozolânico. Segundo os requisitos químicos apresentados na Tabela 7, o rejeito de minério fosfatado, objeto de estudo deste trabalho, poderia ser aplicado como material pozolânico de classe E, visto que a somatória das porcentagens dos óxidos citados acima é maior ou igual a 50%.

De acordo com os dados da Tabela 7, para ser considerado um material pozolânico de classe E, a porcentagem de SO₃ no material deve ser igual ou inferior a 5%, sendo assim o material analisado enquadra-se neste requisito químico, uma vez que pode considerar a porcentagem de SO₃ como igual a 0%, pois este composto não foi detectado na análise química por FRX.

Na análise química quanto aos óxidos, percebe-se um elevado teor de P₂O₅. Segundo Rocha e Borges (2011), no processamento mineral, este minério passa por etapas de cominuição (para atingir o grau de liberação do mineral-minério), peneiramento, deslamagem em hidrociclones e flotação, em uma sequência adequada para o tratamento deste minério. Entretanto, na etapa de cominuição, é gerada uma grande quantidade de finos, apresentando

partículas liberadas tanto de mineral-minério quanto de minerais de ganga, que prejudica a concentração por flotação. Desta forma, é realizada a deslamagem em hidrociclones, antes da flotação, com o objetivo de retirar os finos que influenciam na eficiência da flotação. O produto de granulometria fina da etapa de hidrociclonagem é encaminhado para a barragem de rejeitos. Assim, a alta porcentagem de P_2O_5 é justificada.

4.1.4 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A análise mineralógica da amostra realizada por Difração de Raios-X apresentou três fases minerais. Os minerais identificados foram o quartzo, a fluorapatita e periclásio como podem ser observados no difratograma da Figura 22.

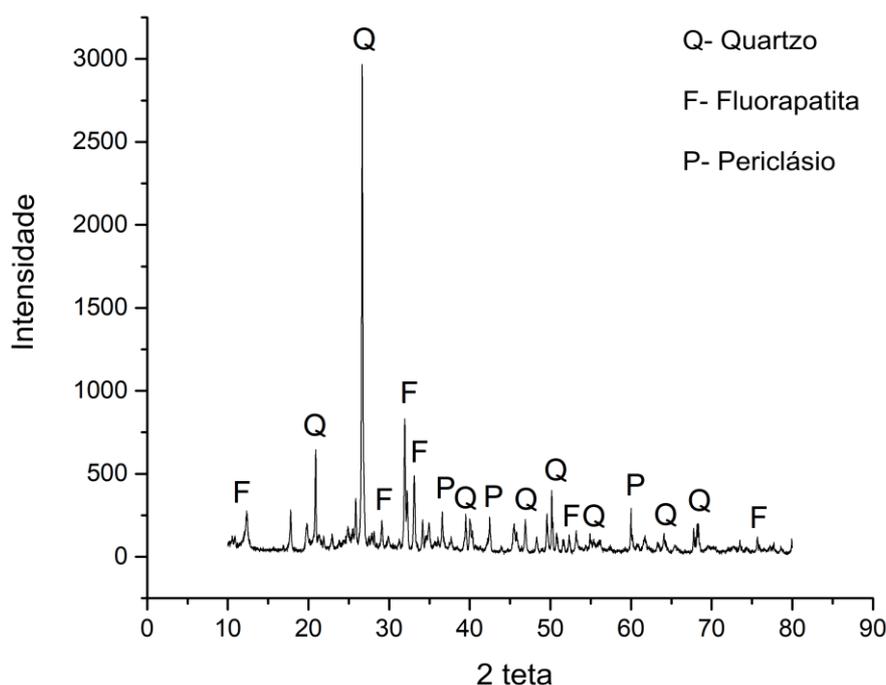


Figura 22 - Análise mineralógica do rejeito por Difração de Raios-X.

O resultado obtido nesta análise mineralógica condiz com geologia local da mina de minério fosfatado que dá origem ao rejeito analisado, consoante a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 1975) o fosfato da região de Patos de Minas é de origem metassedimentar. Inicialmente, existia ocorrência mineral constituída de colofano e argila, dispostos em camadas distintas. Ocorreu na região uma falha do tipo empurrão, o que

acometeu um metamorfismo de baixo grau na ocorrência mineral anterior. Devido a este processo de metamorfismo o colofano sofreu recristalização, transformando-se em fluorapatita, que neste caso é o mineral-minério de fósforo. O processo de falhamento gerou algumas fraturas que foram preenchidas posteriormente por quartzo. O periclásio, que é um óxido de magnésio tem origem nas alterações sofridas pela argila.

Desta forma, o minério fosfatado em questão é composto por camadas de fluorapatita e argila e apresenta frequentemente dobramentos assimétricos. A Figura 23 mostra uma amostra deste minério.

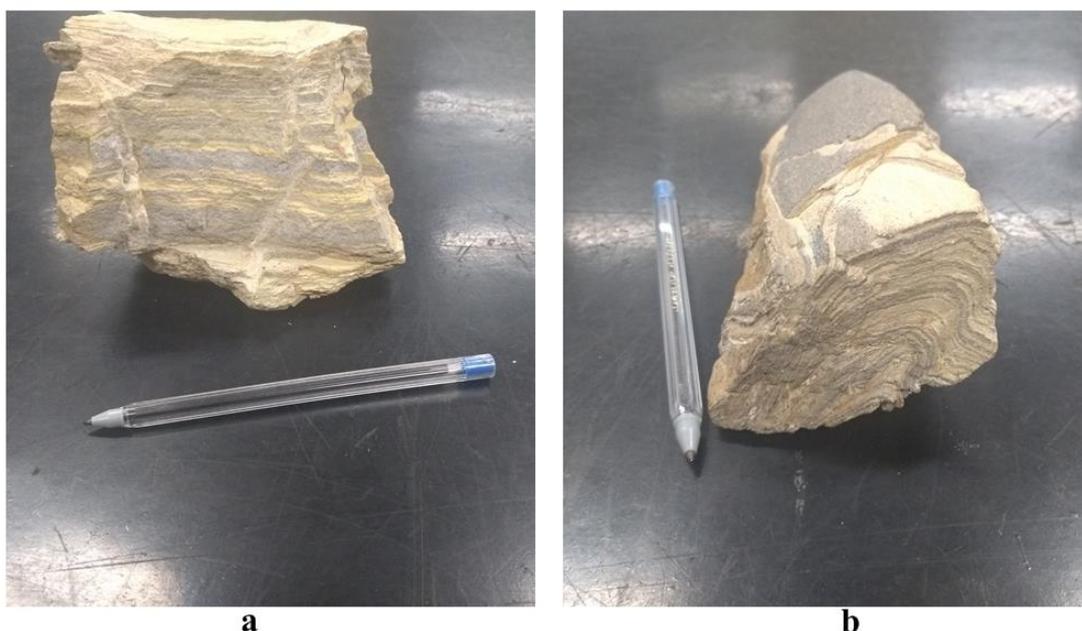


Figura 23 - Amostra de minério fosfatado. a) Minério com camadas claras (argila) e camadas escuras (fluorapatita) e fraturas preenchidas por quartzo. b) Minério dobrado.

4.1.5 UMIDADE

A umidade do rejeito foi determinada através dos procedimentos detalhados na ABNT NBR NM 24/2003: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. A Tabela 15 contém os valores encontrados nas medições.

Tabela 15- Umidade do rejeito de minério fosfatado.

	Umidade		
	1	2	3
Massa da amostra antes da secagem (gramas)	1,00	1,00	1,00
Massa da amostra após a secagem (gramas)	0,89	0,89	0,89
Umidade (%)	11,00	11,00	11,00
Média da Umidade (%)			
11,00			
Desvio Padrão (%)			
0,00			

O material apresenta teor de umidade equivalente a 11,00%, o que era esperado, pois o material é proveniente de uma barragem, que é um método de deposição de rejeito em forma de polpa. De acordo com a Tabela 7, o rejeito apresenta umidade superior ao limite estabelecido pela ABNT NBR 12653/2012.

Sendo assim, para que o material possa ser empregado como material pozolânico de classe E é necessário que o rejeito seja submetido a etapas de secagem, para que a porcentagem de umidade reduzisse até 3%, que é o teor limite estipulado pela norma, podendo assim, ser aplicado como material pozolânico.

4.1.6 PERDA AO FOGO

A determinação da perda ao fogo foi realizada de acordo com a ABNT NBR NM 18/2012. Os resultados dos ensaios estão expressos na Tabela 16.

O material apresentou uma média de perda ao fogo equivalente a 1,00%. Esse valor, de acordo com os requisitos químicos apresentados na Tabela 7, encontra-se dentro do limite estabelecido pela ABNT NBR 12653/2012. Dessa forma, considerando o parâmetro perda ao fogo, o rejeito de minério fosfatado em análise pode ser aplicado como material pozolânico de classe E.

Tabela 16- Ensaio de perda ao fogo.

Perda ao fogo			
	1	2	3
Massa cadinho + amostra ensaiada (gramas)	49,29	252,49	41,82
Massa cadinho + amostra após a calcinação (gramas)	49,28	252,48	41,81
Massa da amostra ensaiada (gramas)	1,00	1,00	1,00
PF/PC (%)	1,00	1,00	1,00
Média PF/PC (%)	1,00		
Desvio Padrão (%)	0,00		

4.2 VERIFICAÇÃO DA DO ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA PELO MÉTODO DE LÚXAN

Atividade pozolânica foi verificada pelo método de Lúxan. A Tabela 17 contém os resultados encontrados na realização dos ensaios, a partir desses valores, confeccionou-se o gráfico apresentado na Figura 24.

Tabela 17- Índice de atividade pozolânica do rejeito.

Índice de atividade pozolânica			
Teste	1	2	3
Condutividade inicial da solução a 25C (mS/cm)	7,167	6,895	7,108
Condutividade final da solução a 25C (mS/cm)	6,613	6,309	6,573
Condutividade inicial da solução a 40C (mS/cm)	9,210	8,860	9,134
Condutividade final da solução a 40C (mS/cm)	8,498	8,107	8,446
Variação da condutividade a 40C (mS/cm)	0,712	0,753	0,687
Média da variação condutividade a 40C (mS/cm)	0,717		
Desvio Padrão (mS/cm)	0,033		

Índice de atividade pozolânica

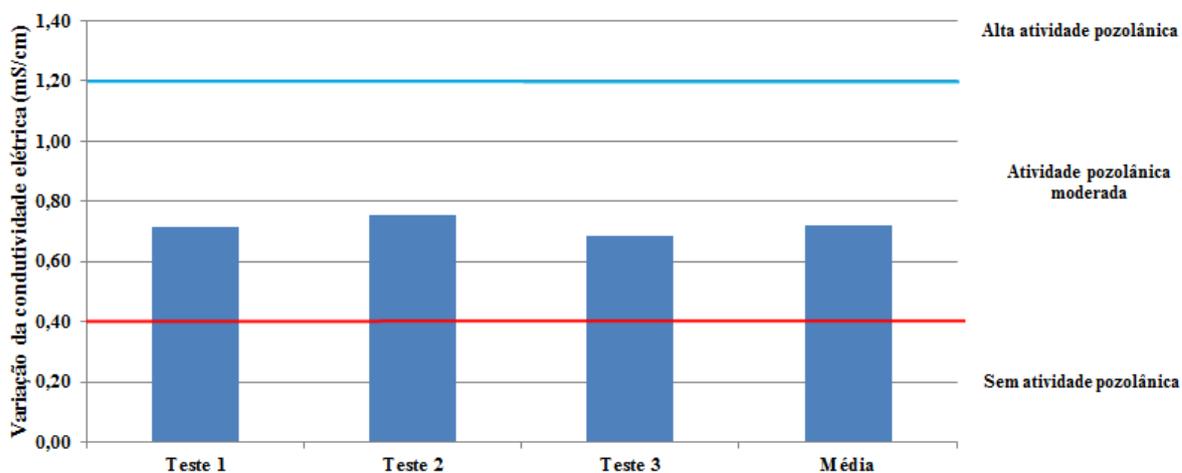


Figura 24- Índice de atividade pozolânica.

Analisando a Tabela 17 verifica-se que a média da variação da condutividade elétrica a 40°C equivale a 0,717 mS/cm. Desta forma, com base na classificação proposta por Luxàn *et al.* (1989) apresentada na Tabela 11, o rejeito de minério fosfatado em estudo possui uma atividade pozolânica moderada, o que afirma que o material tem potencial para ser empregado como material pozolânica de classe E.

Somente os ensaios usando o método de Luxàn não são suficientes para afirmar que o rejeito estudado possui aplicação como material pozolânico. São necessários ensaios como índice de atividade com a cal, com o cimento Portland e com a água requerida, para confirmar que o material apresenta atividade pozolânica satisfatória e que atenda as exigências estabelecidas pela ABNT NBR 12653/2012.

5 CONCLUSÕES

Com os ensaios e testes realizados pode-se concluir que o rejeito de minério fosfatado em estudo atende alguns dos requisitos químicos e físicos definidos pela ABNT NBR 12653/2012 necessários para que seja possível a sua aplicação como material pozolânico de classe E.

Dentre estes requisitos destacam-se a porcentagem do somatório dos óxidos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, a porcentagem de SO_3 , e a perda ao fogo. O primeiro, conforme a norma para material pozolânico de classe E, o somatório de tais óxidos deve ser igual ou superior a 50%, sendo no caso do rejeito estudado igual a 63,100%. Na análise química realizada por Fluorescência de Raios-X, não foi detectado SO_3 , outra propriedade que se enquadra nos requisitos da ABNT NBR 12653/2012. A perda ao fogo do material (1%) é inferior ao limite estabelecido pela norma que é equivalente a 6%.

O único requisito químico analisado que não atendeu as especificações foi o teor de umidade, devido às características do método de deposição do rejeito. O rejeito apresenta teor de umidade igual a 11% e o limite máximo estabelecido é de 3% para materiais pozolânicos de classe E. Entretanto, é possível atingir este valor com operações de secagem do material.

A verificação do índice de atividade pozolânica foi realizada usando o método de Luxàn. De acordo com a classificação de Luxàn *et al.* (1989) o rejeito de minério fosfatado possui atividade pozolânica moderada, o que confirma que este material apresenta potencial para ser empregado na construção civil como material pozolânico.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar álcalis disponíveis em Na_2O conforme a ABNT NBR NM 25.
- Analisar o índice de atividade pozolânica com o cimento aos 28 dias em relação ao controle, com a cal aos 7 dias e com a água requerida.
- Estudar a aplicação do rejeito de minério fosfatado como agregado para a construção civil.
- Estudar processos para a recuperação de P_2O_5 nas frações finas e ultrafinas.

7 REFERÊNCIAS

AEFI. **Associação dos Arquitetos, Agrônomos e Engenheiros de Foz do Iguaçu**. 2014. Disponível em: < [https:// www.aefi.com.br/single-post/2013/03/19/CONSTRU%C3%87%C3%83O-CIVIL-E-O-MEIO-AMBIENTE](https://www.aefi.com.br/single-post/2013/03/19/CONSTRU%C3%87%C3%83O-CIVIL-E-O-MEIO-AMBIENTE)>. Acesso em: 17 jan. 2018.

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de Rejeitos de Mineração de Ferro, In Natura e Segregados, para Aplicação como Material de Construção Civil**. 2014, 112 f.. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6664>>. Acesso em 26 mai. 18.

ALBERS, A. P. F; F. G. Melchiades; R. Machado; J. B. Baldo; A. O. Boschi. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. Universidade do Vale do Paraíba, 2002. Disponível em:<<http://www.scielo.br/pdf/0D/ce/v48n305/a0848305.pdf>>. Acesso em 27 mai. 18.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Boletim Técnico: Guia Básico de Utilização do Cimento Portland BT-106**. São Paulo, 2002. Disponível em:<http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf>. Acesso em 13 mai. 18.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de Alto-forno. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo-Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos- Requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 5 p.

BARROS, H. C. **Fabricação de Tijolos Prensados com Agregados Reciclados de Telhas Cerâmicas, Cimento Portland e Cinzas de Casca de Arroz**. 2012. 112f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental). Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2012. Disponível em:<<http://200.129.241.80/ppgeea/sistema/dissertacoes/51.pdf>>. Acesso em 23 mai. 18.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Relatório Técnico 53 Perfil do Fosfato**: MME 2009. Disponível em:<http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P29_RT53_Perfil_do_Fosfato.pdf/48caf3fe-b399-4032-9337-d63ce39b218d>. Acesso em 28 mai. 18.

BEZERRA, M. A.; BROD, J. A. **Mineralogia da Apatita do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Tapira**. Universidade Federal de Goiás, 2011. Disponível em:<http://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/conpeex/pibicbalcao/trabalhos/MATEUS_ARAUJO_BEZERRA.pdf>. Acesso em 14 jun. 18.

CINCOTTO, M. A.; HELENE, P. **Aglomerantes hidráulicos**. In: P.K. Metha; Paulo J.M. Monteiro. (Org.). **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ed.São Paulo: Pini, 1994, v. , p. 187-238.

CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Relatório de Pesquisa Fosfato Patos de Minas**. Belo Horizonte, 1975.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento**. Brasília: CNI, 2012. Disponível em <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2013/09/23/4970/20131002162355200901e.pdf>. Acesso em 21 mai. 18.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica.** 2009, 98f. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em:<
<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17032/000709056.pdf?sequence=1>>. Acesso em 07 jun. 18.

COSTA, K. A; GUIMARÃES, A. C. R; REIS, M. M; SANTANA. S. A. **Estudo do processo de lixiviação controlada da escória de aciaria em extrator *soxhlet* visando emprego em pavimentos.** Revista *Matéria*, v.22, n.2, 2017. Disponível em:<
<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v22n2/1517-7076-rmat-S1517-7076201700020155.pdf>>. Acesso em 21 mai. 18.

DAM PROJETOS DE ENGENHARIA. **Catálogo *on line* de serviços.** Disponível em:<
<http://dam.com.br/index.php/pt-br/>>. Acesso em 27 nov. 2017.

DEDAVID, B. A; GOMES, C. I; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e preparação de amostras: Materiais Poliméricos, Metálicos e Semicondutores.** Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul 2007. Disponível em: <
<http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>>. Acesso em 31 mai. 18.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral.** Edição 2015.

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, 114 f.. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em:<
http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUDB-8AUPNJ/classifica__o_das_barragens_de_conten__o.pdf?sequence=1>. Acesso em 21 mi. 18.

FDC. Fundação Dom Cabral. 2011. Disponível em:
<<http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/construção-civil-usa-75-dos-recursos/259324>>. Acesso em 17 jan. 2018.

FOLHA DE SÃO PAULO. São Paulo: Grupo Folha. Diário. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/especial/2015/tragedia-no-rio-doce/>> . Acesso em 28 nov. 17.

GALHARDO, P. G. **Estudo da Produção de Cimento com Ênfase no Classe G**. 2014. 106 f.. Projeto de Graduação (Graduação Em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em:<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012107.pdf>> . Acesso em 22 mai. 18.

GOMES, A, C, F. **Estudo de Aproveitamento de Rejeito de Mineração**. 2017, 84 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em:<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-AN9QQC/anacl_udiagomes_disserta__ofinal.pdf?sequence=1> . Acesso em 13 mai. 18.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração**. 1^a ed. Brasília: IBRAM, 2016.128 p. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>> . Acesso em 25 out. 2017.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M.. B.M.; NASCIMENTO, M. “Agrominerais/fosfato”. In: **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. Parte II. Cap.7. p.141-172. Disponível em:<<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1043/3/07.%20AgromineraisFOSFATO%20ok.pdf>>. Acesso em 28 mai. 18.

LOZANO, F, A, E. **Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquica**. 2006, 128 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-14122006-123702/pt-br.php>> . Acesso em 31 mai. 18.

LUXÀN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. **Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement**. *Cement and concrete research*, v. 19, p. 63-68, 1989.

MALQUORI, G. **Portland-Pozzolan Cement**. In: International symposium on the chemistry of cement, 4, Washington, D.C, Paper VIII-3, 1960.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and Pozzolanic Cements**. In: Hewlett, P. C (ed.) *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th edition, Arnold Publishers, London, 1998.

MENEZES et al. **Recycling of granite industry waste from the northeast region of Brazil**. *Environmental Management and Health*, v.13, p.134-142, 2002.

METHA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MONTANHEIRO, T. J., YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y. **Proposta de Pré-Qualificação Pozolânica de Materiais Geológicos: Difratomia de Raios X como Método Alternativo**. *Revista do Instituto Geológico*. São Paulo: 24(1/2), 1-9, 2003

NETTO, R. M. **Materiais Pozolânicos**. 2006, 149f. Monografia (Especialização em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: http://pos.demc.ufmg.br/novocecc/trabalhos/pg1/Monografia_Materiais_Pozolanicos.pdf
Acesso em 23 mai. 18.

OLIVEIRA, H. M. "Cimento Portland". In: ALBURQUERQUE, L.A.F. **Materiais de construção**. 5^a ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000.v.1. p.35- 62.

OLIVEIRA, M. C. A; RODRIGUES, E. P. **Aproveitamento de rejeitos da mineração e beneficiamento de ardósia na fabricação de cerâmica vermelha para construção civil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45, 2001, Florianópolis. Anais...Florianópolis.

PEREIRA, M. F. **Estudo sobre os Tipos de Cimentos Comercializados em Campo Mourão**. 2012, 60 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Construção Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2012. Disponível em:

<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1864/1/CM_COMAC_2012_1_06.pdf>.

Acesso em 22 mai. 18.

PEREIRA, A. C. et al. **Cimento Portland**. 2013. 19p. Sinop. Universidade do Estado de Mato Grosso, 2013. Disponível em:

<http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fo_7092cimento_pobtland_pdf.pdf>. Acesso em 13 mai. 18.

PINTO, C. L.L. et al. **Estudo de caso: principal polo produtor de fosfato e nióbio do país**. 2011. Disponível em: <

<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1171/1/Estudo%20de%20caso%20principal.pdf>>. Acesso em 14 jun. 18.

RESDIL. **Catálogo on line de serviços**. Disponível em:< <http://resdil.com.br/>>. Acesso em 27 mai. 18.

ROCHA, B. G; BORGES, J.M. **Testes Industriais de Flotação com Minério Fosfático de Patos de Minas-MG**. XXIV Encontro Nacional de Minérios e Metalurgia Extrativa. 2011. Salvador. Disponível em:< <http://docplayer.com.br/23215490-Testes-industriais-de-flotacao-com-o-minerio-fosfatico-de-patos-de-minas-mg.html> >. Acesso em 28 mai. 18.

SANTOS, M. A. **Estudo da Influência de Íons Contaminantes na Flotação de Apatita em Coluna**. 2010, 149 f.. Dissertação (Mestrado em Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos). Faculdade de Engenharia Química, Uberlândia, 2010. Disponível em:< <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15142/1/mariana.pdf> >. Acesso em 27 mai. 18.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006, 288 f... Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em:< <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88861> >. Acesso em 3 mai. 18.

SEBASTIANY, L. D. **Avaliação de métodos de determinação do potencial pozolânico de resíduos da indústria de cerâmica vermelha**. 2014, 143 f.. Dissertação (Pós-graduação em

Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014. Disponível em:< www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/4245>. Acesso em 13 mai.18.

SILVA, A, P, M; VIANA, J, P; CAVALCANTE, A, L, B. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. Brasília. 2012. Disponível em:<http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf>. Acesso em 26 out. 17.

SILVA, K. D. C. **Avaliação da Atividade Pozolânica dos Resíduos de Lã de Rocha, Fibra de Vidro e Lã de Vidro**. 2016, 124 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016. Disponível em:<http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/Dissertacao_Defaveri.pdf>. Acesso em 11 jun.18

SILVA, M. R. **Materiais de Construção**. 2^a ed. São Paulo: Pini, 1991. 267 p.

SIQUEIRA, M, D. **Utilização de Resíduos de Mineração na Construção Civil**. 2015, 29 f.. Monografia (Especialização em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em:<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUBDA2SHGH/marina_duque_silveira_utiliza_o_de_residuos_de_minera_o_na_constru_o_civil_cecc_ufmg_jan15.pdf?sequence=1>. Acesso em 13 mai.18

SOMASUNDARAN, P. **Principles of flocculation, dispersion and selective flocculation**. In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing. 1980. Vol. II, c. 48, p. 947- 976.

SOUZA, A. E; FONSECA, D.S. **Fosfato**. 2009. Disponível em:<<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>>. Acesso em 21 mai. 18.

SOUZA, M. H; MOZZER, P. **Sílica Ativa e Cinza Volante**. Disponível em:<http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/4/4c/05_Silica_ativa.pdf>. Acesso em 23 mai. 18.

TASHIMA, M.M. **Cinza de Casca de Arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. 2006, 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. Disponível em <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91490/tashima_mm_me_ilha_prot.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 23 mai. 18.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO. **Relatório de Pesquisa Utilização de rejeitos de barragens de minério de ferro na construção civil**. 2016. Disponível em: <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/Relatorio_MPFFIOROTTI.pdf>. Acesso em 3 jun. 18.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e Mecanismo de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcinadas**. 1989, 212 f.. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrografia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-15092015-145928/en.php>>. Acesso em 22 mai.18

ZHANG, N. et al. **Pozzolanic behaviour of compound-activated red mudcoal gangue mixture**. *Cement and concrete research*, v. 41, p. 270-278, 2011.