

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

GABRIELA MELO PEREIRA

UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO COMO
MATÉRIA PRIMA PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

BELO HORIZONTE

2018

GABRIELA MELO PEREIRA

**UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO COMO
MATÉRIA PRIMA PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais

Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

2018

GABRIELA MELO PEREIRA

**UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO COMO
MATÉRIA PRIMA PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Aprovada em: __/__/__

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva – Orientador

Profa. Dra. Luciana Boaventura Palhares

Profa. Dra. Roberta Viana Ferreira

RESUMO

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro, tendo Minas Gerais 70% das reservas nacionais. Com o benefício econômico surge também a preocupação sobre o correto descarte dos rejeitos gerados, uma vez que no processo de extração e processamento de minério de ferro é gerada uma elevada quantidade de rejeitos. Após o rompimento da barragem do Fundão, na unidade de Germano, em Mariana (MG), operada pela Samarco, a destinação desses rejeitos vem preocupando cada vez mais a sociedade. Neste contexto, esse trabalho teve como intuito avaliar a possibilidade de utilização do rejeito de minério de ferro depositado em barragem na substituição parcialmente da areia utilizada como agregado miúdo para aplicar em argamassa e concreto. Para essa pesquisa utilizou rejeito proveniente do rompimento da barragem do Fundão e cimento Portland CPV. O rejeito passou por um processo de peneiramento para determinação da melhor faixa granulométrica de trabalho, granulometria entre 0,3 e 0,075mm. Em seguida, realizou a caracterização do mesmo utilizando a difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e fluorescência de raios X. Esses ensaios mostraram a sua possível semelhança com a areia, por possuir alto percentual de quartzo. O traço utilizado para a argamassa foi de 1:3 com fator de água/cimento igual a 0,48. Para esse trabalho, optou-se pela substituição da areia por rejeito de mineração em proporções de 50% p/p, 75% p/p e 100% p/p do peso da areia fina, mantendo-se constante o peso do cimento e o fator água/cimento. Após a moldagem dos corpos de prova, foi feito ensaio de absorção de água e resistência à compressão. Os resultados obtidos mostraram que para uma substituição de 100% da areia fina a resistência à compressão foi de 58,78 MPa, para os tempos de cura de 28 dias. Esses resultados foram superiores ao da argamassa sem substituição, 52,13 MPa. Diante dos resultados obtidos conclui-se que esse tipo de rejeito pode ser empregado para confecção de argamassa, substituindo finos de areia.

Palavras-chave: rejeito de mineração, areia, substituição, caracterização, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Brazil is the second largest producer of iron ore, with Minas Gerais having 70% of the national reserves. With the economic benefit also arises the concern about the correct discard of the generated tailings, since in the process of extraction and processing of iron ore is generated a high amount of tailings. After the rupture of the Fundão dam, at the Germano plant in Mariana (MG), operated by Samarco, the disposal of these tailings has been increasingly worrying society. In this context, the purpose of this work was to evaluate the possibility of using the iron ore deposit deposited in the dam to partially replace the sand used as a small aggregate to apply to mortar and concrete. For this research, we used tailings from the dam and CPV Portland cement. The reject underwent a sieving process to determine the best working granulometric range, granulometry between 0.3 and 0.075mm. Then, it was characterized by X-ray diffraction, scanning electron microscopy and X-ray fluorescence. These tests showed its possible similarity with sand, as it has a high percentage of quartz. The trace used for the mortar was 1: 3 with a water / cement factor of 0.48. For this work, it was decided to replace the sand by mining tailings in proportions of 50%, 75% and 100% of the weight of the fine sand, maintaining constant the weight of the cement and the water / cement factor. After the molding of the specimens, water absorption and compressive strength tests were performed. The results showed that for a 100% substitution of the fine sand the compressive strength was 58.78 MPa, for the curing times of 28 days. These results were superior to that of the non-substituted mortar, 52.13 MPa. In view of the obtained results, it can be concluded that this type of tailings can be used to make mortar, replacing sand fines.

Keywords: mining tailings, sand, substitution, characterization, mechanical properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Compósitos Cimentícios	13
Figura 2 - Evolução do consumo de cimento no Brasil (em 1000 Ton.).....	14
Figura 3 – Tipos de Areia	16
Figura 4 – Crescimento da produção de minério de ferro.....	19
Figura 5 – Arrecadação Semestral da TAH 2012.2-2017.1.....	20
Figura 6 - Etapas de beneficiamento do minério	20
Figura 7 – Estrutura da Barragem	23
Figura 8 – Método construtivo de barragem de rejeitos em várias etapas – (A) Método de Montante, (B) Método de Jussante e (C) Método de Linha de Centro.....	24
Figura 9 – Impactos gerados pelo acidente da Samarco	25
Figura 10 - Fluxograma dos materiais e métodos utilizados no trabalho	27
Figura 11 – Ponto de coleta no rejeito no Rio do Carmo	28
Figura 12 – Agitador de Peneiras.....	29
Figura 13 - Equipamento Universal de Ensaios.....	31
Figura 14 – Microestrutura do Rejeito.....	33
Figura 15 – Difratoograma mostrando as fases presentes na amostra de rejeito com granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm	35
Figura 16 - Difratoograma mostrando as fases presentes na amostra de rejeito com granulometria abaixo de 0,3 mm.	35
Figura 17 – Corpos de Prova moldados	36
Figura 18 - Absorção de água e porosidade	37
Figura 19 - Resistência à compressão do rejeito de granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm com tempo de cura de 3 dias.	39
Figura 20 – Resistência à compressão do rejeito de granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm com tempo de cura de 7 dias.	39
Figura 21 - Resistência à compressão do rejeito de granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm com tempo de cura de 28 dias.	40
Figura 22 – Resistência à compressão do rejeito com granulometria abaixo de 0,3 mm.– 28 dias	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclatura de Cimentos.....	15
Tabela 2 – Granulometria da areia.....	16
Tabela 3 – Rejeitos de Mineração.	22
Tabela 4 – Identificação das formulações utilizadas.	30
Tabela 5 – FRX amostras dos rejeitos.	34
Tabela 6 - Absorção de água e a porosidade.....	37

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP: Cimento Portland

DRX: Difração de raios X

FRX: Fluorescência de raios X

MEV: Microscópio eletrônico de varredura

NBR: Norma Brasileira

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3 REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	13
3.1 Compósitos Cimentícios.....	13
3.2 Cimento	13
3.2.1 Tipos de Cimentos.....	14
3.3 Areia	15
3.4 Adições Minerais na Produção de Cimento	17
3.5 Adição de Água	17
3.6 Concreto	18
3.7 Mineração no Brasil.....	19
3.7.1 Rejeito de Mineração.....	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1 Materiais	27
4.2 Caracterização das Amostras.....	28
4.2.1 Peneiramento	28
4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	29
4.2.3 Difratomia de raios X.....	29
4.2.4 Fluorescência de raios X (FRX)	29
4.3 Preparações das Formulações e Processamento dos Corpos de Prova.....	30
4.4 Determinações das Propriedades Físicas e Mecânicas	31
4.4.1 Resistência à compressão (RC)	31
4.4.2 Absorção de Água	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33

5.1 Caracterização química e Mineralógica das Matérias Primas	33
5.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	33
5.1.2 Difração de raios X e Fluorescência de raios X– DRX e FRX	34
5.2 Produção dos Corpos de Prova	36
5.3 Caracterização Física dos Corpos de Prova	37
5.3.1 Absorção de Água	37
5.4 Caracterização Mecânica	38
5.4.1 Resistência à Compressão	38
6 CONCLUSÕES	42
7 TRABALHOS FUTUROS	44
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

A indústria da mineração tem uma enorme importância na economia do Brasil, pois esse setor em 2016 apresentou uma contribuição para a economia do país em US\$ 21,6 bilhões, o que representa 52% do saldo total do comércio exterior do país (IBRAM, 2017). Segundo IBRAM (2010), a indústria de mineração está presente em 1500 cidades, sendo a região de Minas Gerais onde ficam as maiores empresas. Na região do Quadrilátero Ferrífero encontra-se grande quantidade de itabirito, que obtêm como produto pelotas de minério de ferro, e tem como principal destino indústria de siderurgias.

Com o beneficiamento do minério é gerado grandes volumes de rejeitos, que tem como forma de disposição bacias, conhecidas como barragens. Na região de Minas Gerais estas barragens correspondem a cerca de 457 em operação, o que leva a preocupação crescente devido a recentes acidentes que vem ocorrendo nessas estruturas. (FONTES et.al, 2013).

No dia 5 de novembro de 2015, ocorreu um rompimento da barragem do Fundão na região de Mariana, em Minas Gerais. Segundo SAMARCO (2015), o rompimento ocorreu na barragem de Fundão, atingindo a barragem de Santarém, onde continha uma grande quantidade de água, o que levou a uma erosão parcial do seu barramento. Devido esse rompimento, 32,6 milhões de metros cúbicos de rejeitos contidos na barragem, mais de 58% do total, escoou para fora da região da empresa. O material foi se alastrando e atingiu o Rio Doce, chegando ao mar, e atingindo, dentre outras, regiões como Mariana (MG) e Barra Longa (MG).

Apesar de ser o recurso mais utilizado para a deposição final do rejeito da mineração, as barragens devem ser vistas como uma alternativa provisória para a disposição do rejeito. Infelizmente não é o que se veem nas mineradoras do Brasil, as barragens estão sendo usada, a maior parte das vezes, como destino final dos rejeitos. Após o rompimento, tornou-se ainda maior a discussão sobre o desafio de estudos para a viabilidade de aplicação desses rejeitos em diversas atividades (PNRS, 2017).

Esse trabalho tem como intuito abordar o possível reaproveitamento desses rejeitos, mais especificamente o rejeito proveniente do rompimento da barragem do Fundão, como matéria prima em argamassa. Visando verificar a sua influência nas propriedades mecânicas e físicas da argamassa.

Devido a areia ser obtida por meio de mineração, isso pode acarretar em impactos ambientais e econômicos, uma vez que a areia é um recurso não renovável. Assim, a busca

por substituir parcialmente esse agregado é viável, uma vez que reduzirá o consumo do recurso não renovável e encontrará uma destinação para um material sem descarte nobre.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a utilização do rejeito proveniente do rompimento da barragem do Fundão como agregado miúdo, para substituir a areia fina utilizada em argamassa.

2.2 Objetivos Específicos

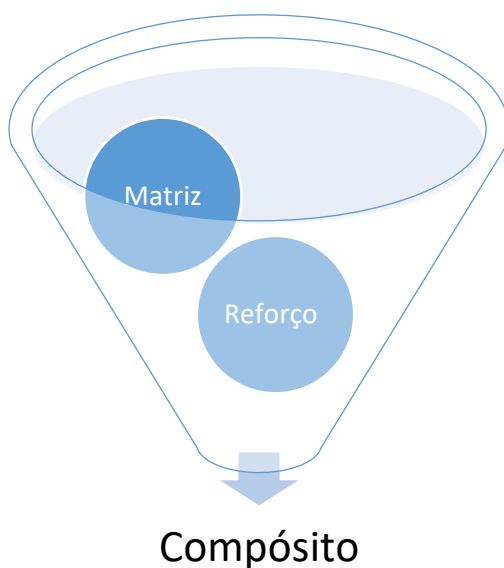
1. Realizar a caracterização mineralógica, química e física do rejeito utilizado;
2. Determinar o traço utilizado para a argamassa e a proporção de substituição;
3. Avaliar as propriedades físicas da argamassa com as diferentes proporções utilizadas;
4. Avaliar as propriedades mecânicas dos corpos provas produzidos.

3 REVISÃO BILIOGRÁFICA

3.1 Compósitos Cimentícios

Um material compósito pode ser definido com um material que recebe um reforço, seja por questão ambiental ou para melhorar alguma propriedade do material natural. Conforme pode-se observar na figura 1, o compósito é um material multifásico. Esse material é formado por uma fase chamada de matriz, que engloba o material natural sem adição, e a fase do aditivo, chamada de reforço (ESCARIZ, 2008). Conforme Gama et.al (2014), o estudo do reforço não é apenas uma questão ambiental, mas também um importante mecanismo que possa agir para melhor a durabilidade de um concreto.

Figura 1 – Compósitos Cimentícios.



Fonte: Escariz, 2008.

3.2 Cimento

Conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2010), o cimento Portland é definido como um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes que endurece quando em contato com a água. Devido seu baixo custo e boas propriedades mecânicas, esse material tem sido utilizado em diversas áreas da construção civil (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Com sua capacidade aglomerante, o cimento é muito empregado em argamassa e concreto com o intuito de ocorrer à aglutinação necessária para ambos. De acordo com CALLISTER (2008), esse material pode ser definido como cimento hidráulico, visto que sua dureza ocorre devido às reações químicas com a água.

Segundo a NBR 5732 (ABNT, 1991a), o principal constituinte do cimento Portland são os silicatos de cálcio, sendo esse material formado pela moagem de clínquer Portland. Para a sua produção deve se adequar ao teor de cálcio e sílica presentes nas matérias primas, podendo assim adicionar materiais como os pozolânicos, carbonáticos e escórias granuladas de alto forno. Vale ressaltar que, o consumo de cimento é diretamente proporcional a economia brasileira, como mostra a figura 2 (SNIC, 2017).

Figura 2 - Evolução do consumo de cimento no Brasil (em 1000 Ton.).



Fonte: SNIC, 2017.

Devido ao calcário, a principal matéria prima do cimento, estar disponível com facilidade na maioria dos países, a indústria de cimento está presente em todos os continentes. Na América Latina, o Brasil, seguido do México, é o maior produtor e consumidor de cimento (somando 60% de consumo) (SERASA EXPERIAN, 2014).

3.2.1 Tipos de Cimentos

Com a introdução das especificações dadas pela American Society for Testing and Materials – ASTM, as indústrias foram limitadas a produzirem apenas alguns tipos de cimentos. Esses cimentos passaram a ser representados por números romanos seguidos de letras, de acordo com sua composição (PAIXÃO, 2011).

Os parâmetros que determinam o tipo de cimento que irá ser utilizado em uma argamassa/concreto variam de acordo com o cimento escolhido, tornando determinante essa escolha. As normas referentes a cada cimento específico, juntamente com sua nomenclatura pode-se observar na tabela 1 (ABCP, 2002). De acordo com a SNIC (2010), no Brasil o cimento do tipo CII é o mais comercializado, representando 67% de todo cimento produzido no ano de 2009.

Tabela 1 – Nomenclatura de Cimentos.

Nome Técnico	Sigla	NBR ABNT
Cimento Portland Comum	CP I	NBR 5732:1991
Cimento Portland comum com adição	CP I - S	
Cimento Portland composto com escória	CP II - E	NBR 11578:1991
Cimento Portland composto com pozolana	CP II - Z	
Cimento Portland composto com filer	CP II - F	
Cimento Portland de alto-forno	CP III	NBR 5735:1991
Cimento Portland pozolânico	CP IV	NBR 5736:1991
Cimento Portland de alta resistência inicial	CPV ARI	NBR 5733:1991
Cimento Portland resistente a sulfatos	RS	NBR 5737:1991
Cimento Portland de baixo calor de hidratação	BC	NBR 13116:1994
Cimento Portland branco estrutural	CPB	NBR 12989:1993
Cimento Portland branco não estrutural	CPB	
Cimento para poços petrolíferos	CPP	NBR: 9831: 2006

Fonte: ABCP 2002, adaptado.

Para a escolha de um cimento adequado para dada operação deve se levar em conta além da disponibilidade do cimento específico na região, as propriedades que se deseja obter na argamassa/concreto. Outros parâmetros também devem ser verificados, tais como tipo de cura, tempo para desformar e condição de aplicação (CORDEIRO, 2006).

3.3 Areia

De acordo com a NBR 7211 (1992), a areia é classificado como um agregado miúdo, sem forma e volume definido, que passa pela peneira de 4,8 mm e fica retida na de 0,075 mm. A qualidade desse agregado miúdo é verificada pela comparação entre as resistências à compressão de corpos de provas de diferentes tipos de areia (BAUER, 1995).

As areias têm como constituinte principal o quartzo, 95% de toda constituição. Essa substância origina da degradação de rochas e pode conter diversas granulometrias

classificadas de acordo com a norma NBR-7211. A figura 3 (IERVOLINO,2012) e tabela 2 (RODRIGUES, 2012) mostram a variação dessa granulometria.

Figura 3 – Tipos de Areia.



Fonte: Iervolino 2012.

Tabela 2 – Granulometria da areia.

Tipo de Areia	Mínima	Máxima
Muito fina	0,15	0,60
Fina	0,60	1,20
Média	1,20	2,40
Grossa	2,40	4,80

Fonte: Rodrigues 2012.

Ressaltando que, a areia é extraída através da mineração, o que pode causar impactos ao meio ambiente e a economia do país, uma vez que é um bem não renovável, que pode gerar impactos ambientais irreversíveis. Com o intuito de diminuir esses impactos, surgem cada vez mais novas alternativas para diminuir ou até mesmo substituir esse material essencial na construção civil (BRANDT,1998).

3.4 Adições Minerais na Produção de Cimento

O termo adição mineral pode ser definido como qualquer material, exceto o cimento, aglomerante e água, que pode ser adicionado à argamassa/concreto a qualquer momento modificando as propriedades dessas (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Conforme trabalhos feitos por Nita e John (2007), as adições minerais são compostas de silicatos ou sílica-aluminatos amorfo que individualmente não possui atividade aglomerante. Porém, em contato com a água a uma temperatura ambiente passa a reagir com o hidróxido de cálcio formando compostos com atividade cimentantes.

Os principais tipos de aditivos minerais são: metacaulim, sílica ativa, escória de alto forno e cinza volante. Podendo também ser classificada em cimentantes, pozolânicos e filers. A maioria das pesquisas elaboradas no Brasil trata o aditivo escória como o mais utilizado no país (GOMES, 1995).

De acordo com Soares (2010), o aditivo filer é um material constituído principalmente de partículas minerais, como pó de calcário, que apresenta um diâmetro médio bem similar ao do cimento Portland. Quando adicionado em uma quantidade inferior a 10% na mistura pode melhorar a qualidade do concreto.

O aditivo cimentante é um material que para formar um produto cimentante não necessita do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland (MANTUANO NETTO, 2006). Já os aditivos pozolânicos, segundo a norma NBR 12653, pode ser definido como um material constituído de sílica ou sílica-alumina. Esse material possui individualmente pouca atividade aglomerante, mas em contato com a água reage com hidróxido de cálcio passando a agir como esperado (ABNT,1992). De acordo com a quantidade de hidróxido de cálcio liberado, é determinada a eficiência da pozolana. Esse material pode conferir características na argamassa e concreto, como: inibição de reação álcali-agregado, o que gera maior resistência ao ataque químico, diminuição do calor de hidratação, dentre outros.

De acordo com ALMEIDA (1990), variações nas propriedades e características de um aditivo adicionado a mistura de argamassa/concreto poderia levar a um resultado não esperado. Com isso, deve-se fazer análise prévia do aditivo, para conhecer suas características como a uniformidade e compatibilidade com os materiais da mistura.

3.5 Adição de Água

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), devido à presença de molécula composta por C-S-H, no cimento, proporciona uma grande afinidade com a água. Essa ligação pode classificar a água adicionada em diferentes tipos, são eles:

- Vapor de água: enquanto os poros maiores são preenchidos por água, o restante é preenchido por vapor de água;
- Água capilar: a água fica localizada nos grandes poros capilares;
- Água adsorvida: responsável pela fluência dos materiais, força superficiais do sólido na pasta de cimento. Quando ocorre sua retirada ocasiona a retração dos materiais.
- Água interlamelar: associa a estrutura C-S-H, que quando secado pode gerar forte contração;
- Água quimicamente combinada: componente da estrutura hidratada da pasta de cimento. Sua secagem pode ocasionar destruição dos compostos hidratados.

3.6 Concreto

O concreto é definido como um material composto por agregados e aglomerantes ligados, que após a mistura apresenta-se no estado fresco. Nesse estado, ele pode ser manuseado e modelado com facilidade, passando posteriormente ao estado contraído, endurecendo (PETRUCCI, 1978).

O agregado presente em um concreto pode ser: areia, pedra britada, escória de alto forno ou pedregulho. A areia é definida como um agregado miúdo, partículas menores que 4,8 mm. Já o pedregulho é um agregado graúdo, maiores que 4,8mm (MEHTA *et al.*, 1994).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o concreto é um material que em muitos países seu uso é dez vezes maior do que o uso do aço. Nos Estados Unidos, em 1963, 63 milhões de toneladas de cimento Portland foi utilizado para fazer 500 milhões de toneladas de concreto, o que representou cinco vezes o consumo de aço no ano, em massa.

Uma das principais classificações do concreto envolve a sua resistência à compressão, aos 28 dias, podendo ser dividida em (MEHTA E MONTEIRO, 2008):

- Concreto de baixa resistência: resistência menor que 20 Mpa;
- Concreto de resistência moderada: resistência maior de 20 Mpa e menor que 40 Mpa;
- Concreto de alta resistência: resistência maior que 40 Mpa.

Para decidir a dosagem adequada para aquela aplicação do concreto, deve se fazer um estudo para determinar a melhor proporção dos materiais utilizados. A verificação desse traço é feito principalmente por teste de resistência a compressão (IBRACON,2011).

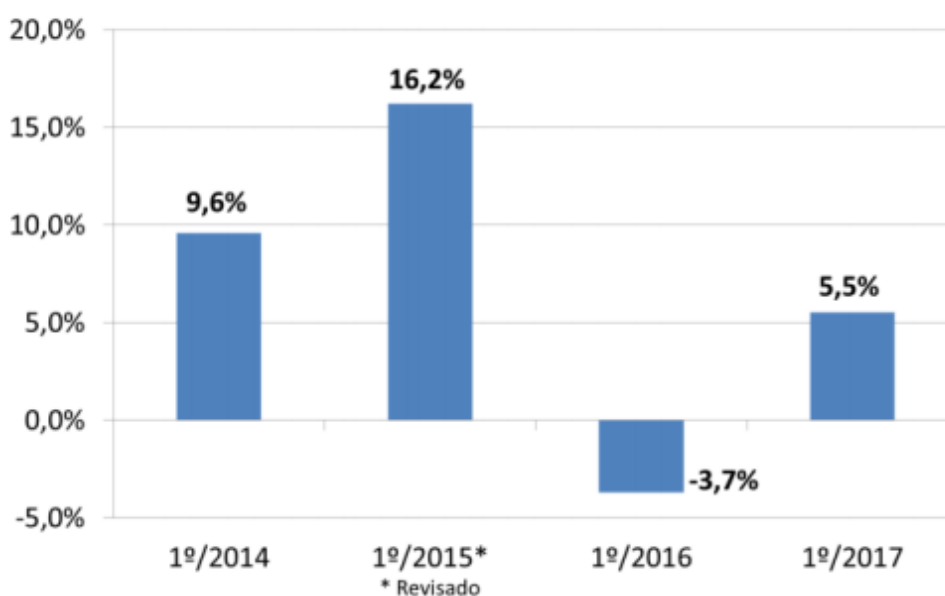
De acordo com Mehta *et al.* (1994), pode se definir argamassa como concreto sem a presença de agregado graúdo, ou seja, é uma mistura composta por cimento, agregados finos e água. A principal aplicação de argamassa está na construção civil, presente em lajes, telhas e diversos pré-moldados (ABCP,2004).

3.7 Mineração no Brasil

O Brasil foi o terceiro maior produtor de minério do mundo no ano de 2014, seguindo a China e Austrália, produzindo cerca de 411 milhões de toneladas de minério de ferro, sendo o estado de Minas Gerais o principal produtor (JESUS, 2015).

Conforme nota se na figura 4, o Brasil teve um crescimento na variação do índice de produção mineral para o ano de 2017 se comparado com o de 2016. Para a fabricação de aço e ferro fundido tem o minério de ferro uma grande importância, pois esse representa 99% de toda composição dos mesmos (DNPN, 2011).

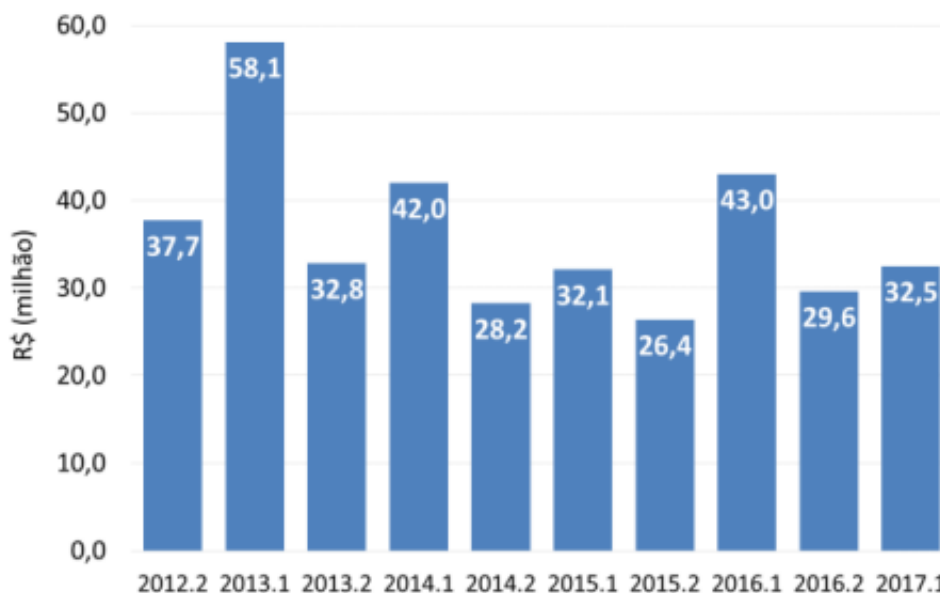
Figura 4 – Crescimento da produção de minério de ferro.



Fonte: DNPM/DIPLAM 2017.

De acordo com DNPM (2017), a mineração do Brasil referente ao 1º/2017 teve como taxa anual por hectare (TAH) aproximadamente R\$32,5 milhões (figura 5). Esse valor tem a Bahia (20,1%), Minas Gerais (14,4%) e Goiás (10,6%) os cinco estados que mais arrecadaram.

Figura 5 – Arrecadação Semestral da TAH 2012.2-2017.1.

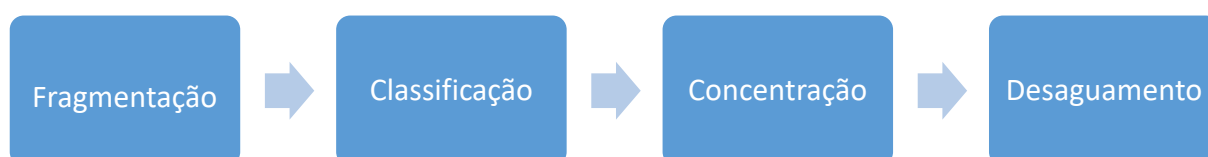


Fonte: DNPM/DIPLAM 2017.

A maioria das reservas minerais fica no estado de Minas Gerais, compondo uma área de 700 km² com 30 cidades como Belo Horizonte e Ouro Preto. Esse ferro explorado vem de uma rocha resultante de ação metamórfica rico em ferro e sílica, mais conhecida como itabirito (ENDO *et al.*, 2009).

Segundo Pormim (2008), o itabirito por não apresentar um teor muito elevado de ferro deve ocorrer várias etapas durante o seu processamento e beneficiamento. O processo de beneficiamento se divide de acordo com o fluxograma apresentado na figura 6.

Figura 6 - Etapas de beneficiamento do minério.



Fonte: Pormim 2008, adaptado.

De acordo com Milonas (2006), a primeira etapa do processo de beneficiamento é a fragmentação. Essa etapa recebe o mineral lavrado e visa diminuir o tamanho desse através do processo de britagem e moagem. Gomes (2009a) relata em suas pesquisas que alguns dos minérios são obtidos sem passar pelo processo de moagem, visto que esse processo representa uma segunda etapa para redução granulométrica.

Após o processo de fragmentação, ocorre a classificação, com um peneiramento e ciclonagem com o intuito de que ocorra a separação das partículas. A concentração tem por objetivo a separação do material para que ocorra a recuperação dos minerais presentes, reduzindo a quantidade de contaminantes, principalmente sílica e alumina (Guimarães, 2011). De acordo com Gomes (2009 a), pode se definir a quantidade de contaminantes naquele mineral observando a quantidade de finos presentes. Quanto maior a quantidade de finos, maior será a quantidade de contaminantes presentes.

Um processo muito utilizado na etapa de concentração é a flotação. Esse processo é utilizado quando o teor do mineral está sempre em pequena quantidade associada ao minério bruto. O processo de flotação, geralmente, gera um rejeito de característica arenosa com alto teor de SiO_2 (MILONAS, 2006).

Durante o processo de beneficiamento é utilizada uma grande quantidade de água para que ocorra a lavagem e retirada de impurezas. Assim, o produto final apresenta-se em forma de lama, de onde é retirado o produto desejado e liberado o rejeito. Finalizando o beneficiamento com a etapa de desaguamento, que visa obter um produto com baixa umidade (MILONAS, 2006).

3.7.1 Rejeito de Mineração

De acordo com Menezes *et al.* (2012), pode se definir rejeitos de mineração como materiais friáveis, ou seja, materiais que quando adicionados às massas cerâmicas ocasionam a diminuição de sua plasticidade e apresentam constituição química e granulométrica que variam em função da origem do material.

Os rejeitos podem ser classificados, de acordo com a NBR 10.004, em dois tipos levando em conta os riscos à saúde e meio ambiente, são eles (ABNT,2004):

- Classe I : Rejeitos Perigosos;
- Classe II: Não Perigosos.

A atividade mineração gera um grande benefício econômico, mas por outro lado grandes quantidades de rejeitos são gerados juntamente. Esses rejeitos que são originados

durante todo o processo de beneficiamento do minério, podem ser divididos em 3 tipos, são eles (PORMIM, 2008):

- Rejeito líquido: São os rejeitos gerados devido à utilização de água no processamento, como vazamentos de óleos e ácidos. Esse rejeito afeta principalmente os lençóis freáticos.
- Rejeito sólido: São constituídos normalmente por minérios pobres, rejeitos finos ultrafinos, dentre outros. A disposição ocorre em pilhas.
- Lamas: Rejeito gerado durante o processo de beneficiamento, devido à decantação de efluentes. Normalmente, a disposição desse tipo de rejeito ocorre em barragens.

O rejeito pode ser também classificado em rejeitos finos e granulares. Os rejeitos finos (quartzo, argila e silte) são normalmente produzidos na etapa de concentração. Esses rejeitos têm como características ser altamente compressíveis, dispostos em forma de lama fluída (LIMA, 2006).

De acordo com Espósito (2000), os rejeitos grossos provenientes da mineração de ferro são formados principalmente por hematita e em maior quantidade por quartzo. Segundo Andrade (2014), devido essa grande quantidade de quartzo presente nesses rejeitos, os mesmos podem ser aplicados como agregado miúdo para argamassa, além de material para incorporação à cerâmicas e como filler. Guimarães (2011) em seu trabalho apresentou os tipos de rejeitos e a forma de descarte dos mesmos, conforme tabela 3.

Tabela 3 – Rejeitos de Mineração.

Fração	Método de Concentração	Rejeito	Destinação do Rejeito
$(6,3 < \phi < 31,5)\text{mm}$	-	-	-
$(1,0 < \phi < 6,3)\text{mm}$	Jigagem	Rejeito de jigagem	Pilhas de rejeitos
$(0,15 < \phi < 1,0)\text{mm}$	Concentração Magnética ou espirais	Produto não magnético ou rejeito de espirais	Pilhas de rejeitos ou barragens
$(\phi < 1,5)\text{mm}$	Concentração Magnética e/ou Flotação	Produto não magnético e/ou rejeito de flotação	Barragens
$(\phi < 0,010)\text{mm}$	-	Lamas	Barragens

Fonte: Guimarães 2011, adaptado.

Silva (2008) mostrou que os de rejeitos finos de minério de ferro são compostos por siltes argilosos e argilas siltosas, com frações especialmente próximas nos casos do ferro/itabirito (36% silte e 36% argila) e ferro/hematita (47% silte e 48% argila). Vale ressaltar que no Brasil, segundo a norma NBR-7211, os tamanhos médios dos grãos de silte de 0,002 a 0,06 mm e da argila menor que 0,002 mm.

De acordo com COPAM (2002), barragem pode ser definida como uma estrutura que contém rejeitos e água. É a forma de descarte mais utilizada no processamento de minério de ferro. Conforme pode-se observar na figura 7, uma barragem é dividida em estruturas, sendo os dois principais tipos de rejeitos (rejeito fino e rejeito arenoso) dispostos separadamente (SAMARCO, 2015).

Figura 7 – Estrutura da Barragem.



Fonte: Samarco 2015

Os principais componentes de uma barragem são (SAMARCO,2015):

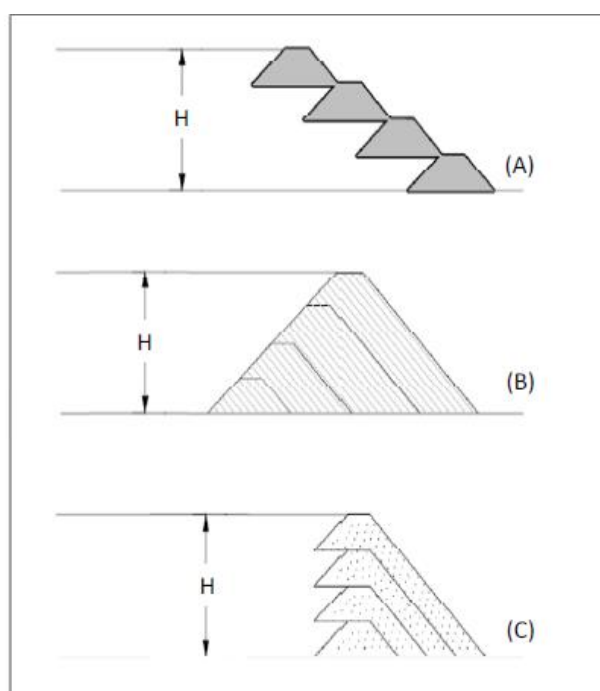
1. Dique principal: estrutura com função de conter os rejeitos que serão depositados na barragem;
2. Crista: Ponto mais alto de uma barragem, que serve como parâmetro para iniciar o despejo do rejeito fino;

3. Reservatório de rejeito arenoso: Local específico para a deposição de rejeitos arenosos originados pelo processo de beneficiamento do minério;
4. Disposição de rejeito fino (lama): Local específico para a deposição de rejeitos finos originados pelo processo de beneficiamento do minério;
5. Diques auxiliares: Local onde delimita as áreas que podem ser feitas a disposição dos rejeitos;
6. Ombreira: Determina o terreno onde está a barragem;
7. Vertedouro: local específico para ocorrer à saída de água;
8. Drenagem interna: estrutura responsável pela ocorrência da drenagem da água.

Para construir uma barragem podem-se utilizar dois métodos: método em única etapa ou por várias etapas. O método por várias etapas é o mais utilizado, pois eliminam algumas das desvantagens de se ter uma etapa única, como uma obrigatoriedade de área de empréstimo e elevado investimento inicial (RUSSO, 2007).

Conforme pode ser observado na figura 8, o método de várias etapas se divide em três tipos (Montante, Jusante e Linha de Centro). O Método Montante é considerado o método com maior dificuldade para construção, mas ao mesmo tempo é o método mais atrativo economicamente (RUSSO, 2007).

Figura 8 – Método construtivo de barragem de rejeitos em várias etapas – (A) Método de Montante, (B) Método de Jusante e (C) Método de Linha de Centro.



Fonte: Russo 2017.

Entretanto, quando a capacidade ou manutenção dessas barragens não forem cuidadosamente avaliadas podem ocorrer rompimentos. Como exemplo, pode-se citar o rompimento da barragem de Fundão no ano de 2015. Essa barragem continha um volume de 32,6 milhões de metros cúbicos de rejeitos, o que acarretou em prejuízos incontáveis. O acidente levou a contaminação do Rio Doce e impactou diversos municípios em Minas Gerais e Espírito dos Santos, conforme mostra a figura 9 (SAMARCO, 2015).

Figura 9 – Impactos gerados pelo acidente da Samarco.



Fonte: Samarco 2015.

A partir desse desastre ecológico vários pesquisadores buscaram uma forma de reutilização desse tipo de rejeito, que é depositado em barragem. Uma alternativa que já tinha sido sugerida por Kulaif (2012) voltou a ser reavaliado, o uso desse rejeito em substituição da areia fina em argamassa e concreto. Outro fator relevante na substituição da areia é a diminuição dos impactos gerados pela sua extração.

Franco *et al* (2014) realizou estudos para verificar essa possível substituição como agregado miúdo em concreto. Para sua pesquisa utilizou uma taxa de substituição de 0,5%; 5%; 10% e 50%. Após moldados os corpos de prova o mesmo realizou ensaios de resistência

à compressão e flexão, obtendo resultados que se mostraram satisfatórios para tais dosagens, concluindo a viabilidade de tal substituição.

Além desse uso, teve vários estudos para incorporar esse rejeito em argila com a intenção de avaliar as modificações provocadas nas propriedades físicas e mecânicas das argilas após esta assimilação. Chaves (2009) elaborou esse estudo com o minério de ferro proveniente do município de Jucurutu, no estado do Rio Grande do Norte. Após o estudo ele verificou que a proporção de rejeito que otimizou as propriedades físicas e mecânicas da argila foi a de 5%, evidenciando assim um bom emprego para esse material.

Campanha (2011) buscou o estudo para caracterizar rejeitos de minério de ferro com o objetivo de verificar a aplicabilidade de seu uso em pavimentação. Os ensaios obtiveram resultados positivos, mostrando ser compatíveis para seu emprego como materiais para sub-base ou base em solos cimento.

Já Nociti (2011) avaliou a viabilidade da adição de uma quantidade de rejeito de minério de ferro na massa cerâmica. Após análise dos seus resultados dos ensaios determinados, pôde concluir que a adição de rejeitos nas quantidades adequadas permite a fabricação de blocos cerâmicos para vedação, ou seja, sem função estrutural.

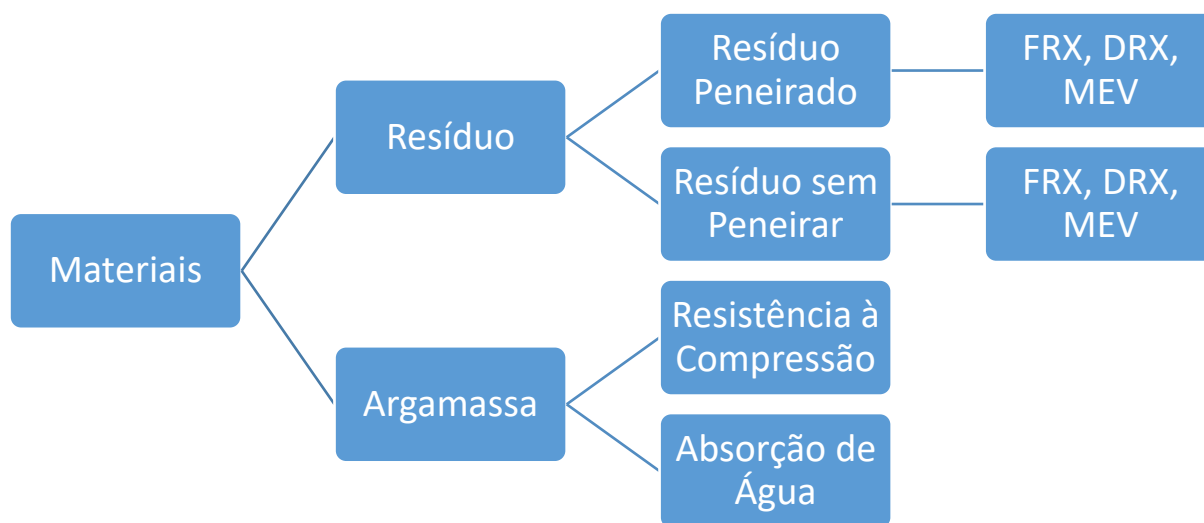
4 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, realizou-se inicialmente a caracterização do rejeito proveniente da barragem do Fundão por meio de ensaios de difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e fluorescência de raios X (FRX).

A avaliação dos corpos de prova, produzidos com substituição parcial da areia fina pelo rejeito (previamente peneirado para retirada do silte e da argila) nas proporções de 50, 75 e 100% em massa, foi realizada após 3, 7 e 28 dias de cura. Após a cura dos corpos de prova, foi avaliada a sua durabilidade por meio do ensaio de resistência a compressão e absorção de água. E com o intuito de verificar a influência da argila e do silte (presentes no rejeito) na durabilidade foi moldado também corpos de prova com 28 dias de cura com substituição de 50,75 e 100% da areia fina pelo rejeito completo.

O fluxograma representado na figura 10 ilustra as etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho.

Figura 10 - Fluxograma dos materiais e métodos utilizados no trabalho.



Fonte: Própria autora.

4.1 Materiais

O estudo utilizou areia normal brasileira, nas 4 frações granulométricas – super fina, fina, média e grossa - seguindo especificações da norma NBR 7214 (2015), produzida pelo IPT. Já a água foi utilizada a fornecida pela rede da COPASA e o cimento foi o Nacional CPV, devido a sua maior resistência inicial.

A amostra do rejeito de mineração utilizada foi coletada à margem do Rio do Carmo (figura 11), próximo ao município de Barra Longa, MG. Após a coleta, as amostras foram secas em estufa à 100°C por 24 horas. Depois de secas elas foram desagregadas, homogeneizadas e quarteadas em alíquotas de 200 g para sequência do trabalho.

Figura 11 – Ponto de coleta no rejeito no Rio do Carmo.



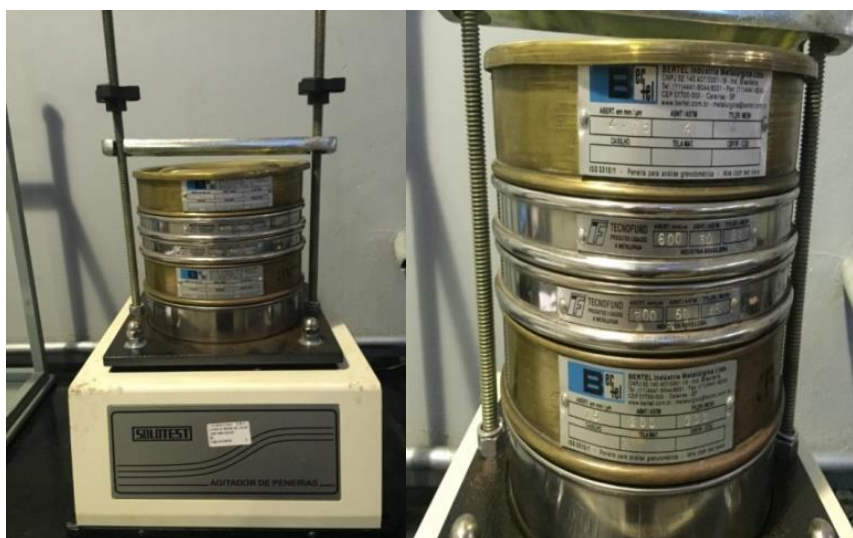
Fonte: G1 2016.

4.2 Caracterização das Amostras

4.2.1 Peneiramento

Para separar a argila e o silte do material arenoso presente no rejeito foi realizado o peneiramento a seco, utilizando o agitador de peneiras Solotest (com agitação de 20 rpm por 10 minuto) e as peneiras de aberturas de 0,3 mm e 0,075 mm, além de duas peneiras de alívio, conforme figura 12. Essas peneiras foram definidas de acordo com uma adaptação feita na norma NBR-7211.

Figura 12 – Agitador de Peneiras.



Fonte: Própria autora.

4.2.2 Microscopia eletrônica de varredura

As análises no MEV foram realizadas utilizando o equipamento Shimadzu SSX-550, equipado com detector de elétrons secundários, onde foram geradas as imagens da morfologia das amostras. Para tal, as amostras em pó foram recobertas com ouro e as análises foram realizadas com aumento de 350X.

4.2.3 Difratometria de raios X

As análises no DRX, pelo método do pó, foram realizadas utilizando o difratômetro Shimadzu XRD – 7000 nas seguintes condições de operação: radiação $\text{CuK}\alpha$ (35KV/ 40mA), velocidade do goniômetro $0,02^\circ$ em 2θ por passo, com tempo de contagem de 0,6 segundos por passo e coletados de 5° a 80° em 2θ . As interpretações dos espectros foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF 02 (ICDD, 2003).

4.2.4 Fluorescência de raios X (FRX)

As análises de FRX foram realizadas utilizando o equipamento Shimadzu EDX-720. As análises foram realizadas em pastilhas prensadas e sob vácuo, em termos de óxidos.

4.3 Preparações das Formulações e Processamento dos Corpos de Prova

Foram definidos 7 formulações para produção dos corpos de prova. Para 4 traços foram definidas diferentes idades de cura (3, 7 e 28 dias). A fração de areia fina utilizada nesses 4 traços foi substituída em peso por 0%, 50%, 75% e 100% do rejeito passante na peneira de 0,3 mm e retido na peneira de 0,075 mm. Para os outros 3 traços foi usado apenas um tempo de cura (28 dias) e a substituição de 50% p/p, 75% p/p e 100% p/p em peso da areia fina foi feita com o rejeito na granulometria abaixo de 0,3 mm (amostra passante na peneira de 0,3 mm). A tabela mostra as formulações utilizadas.

Tabela 4 – Identificação das formulações utilizadas.

Identificação	Idade	Relação a/(c)	% p/p de substituição	Traço
T001 M1	7 dias	0,48	0	1:3:0,48
T002 M1	7 dias	0,48	50	1:3:0,48
T003 M1	7 dias	0,48	75	1:3:0,48
T004 M1	7 dias	0,48	100	1:3:0,48
T001 M2	28 dias	0,48	0	1:3:0,48
T002 M2	28 dias	0,48	50	1:3:0,48
T003 M2	28 dias	0,48	75	1:3:0,48
T004 M2	28 dias	0,48	100	1:3:0,48
T001 M3	3 dias	0,48	0	1:3:0,48
T002 M3	3 dias	0,48	50	1:3:0,48
T003 M3	3 dias	0,48	75	1:3:0,48
T004 M3	3 dias	0,48	100	1:3:0,48
T005	28 dias	0,48	50	1:3:0,48
T006	28 dias	0,48	75	1:3:0,48
T007	28 dias	0,48	100	1:3:0,48

Fonte: Própria autora.

Os corpos de prova foram produzidos de acordo com a norma NBR7215:1996. Foram moldados corpos de provas cilíndricos com dimensões de 50x50x100 mm. Vale ressaltar que, os mesmos foram conservados nos moldes para cura inicial, sendo posteriormente submetidos à cura de água saturada de cal, até alcançar a idade específica para realizar os ensaios.

4.4 Determinações das Propriedades Físicas e Mecânicas

Após a cura, os corpos de prova foram submetidos à determinação das propriedades físicas e mecânicas. Foi avaliada a absorção de água, porosidade aparente e resistência à compressão uniaxial.

4.4.1 Resistência à compressão (RC)

Os corpos de prova moldados de cada traço foram analisados em um período de 3,7 e 28 dias de cura. Para o ensaio foi utilizada a máquina universal de ensaio EMIC GR048 (figura 13), com capacidade máxima de 300kN e o capeamento foi feito com o auxílio de um capeador metálico de neoprene. O ensaio foi realizado em triplicada para cada composição definida anteriormente.

Figura 13 - Equipamento Universal de Ensaio.



Fonte: Própria Autora.

A resistência à compressão foi calculada conforme a equação (1) abaixo (CANDIDO,2012):

$$RC = P/A \quad (1)$$

Sendo:

RC = Resistência à compressão uniaxial (MPa);

P = Carga de ruptura (kN);

A = Área da secção transversal (mm²);

4.4.2 Absorção de Água

A absorção de água foi realizada de acordo com a norma NBR 9778 (1990). Dois corpos de prova de cada traço com 28 dias de cura foram secos a 105°C até que a constância da massa fosse alcançada (M_s). Em seguida, foram submergidos em água por um período de 72 horas. Após esse período os mesmos foram retirados da água e o excesso de água superficial foi removido com auxílio de papel toalha, obtendo assim a massa saturada (M_{sat}) e o índice de absorção de água foi calculado de acordo com a Equação (2).

$$AA (\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

AA = Índice de absorção de água (em porcentagem);

M_{sat} = massa do corpo-de-prova saturado (g);

M_s = massa do corpo-de-prova seco em estufa (g).

Para calcular a porosidade aparente realiza-se a pesagem dos corpos de prova imersos em água. Essa massa é definida com massa imersa (M_i), e calcula-se a porosidade de acordo com a equação (3).

$$IV(\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

M_i = massa do corpo de prova imerso em água.

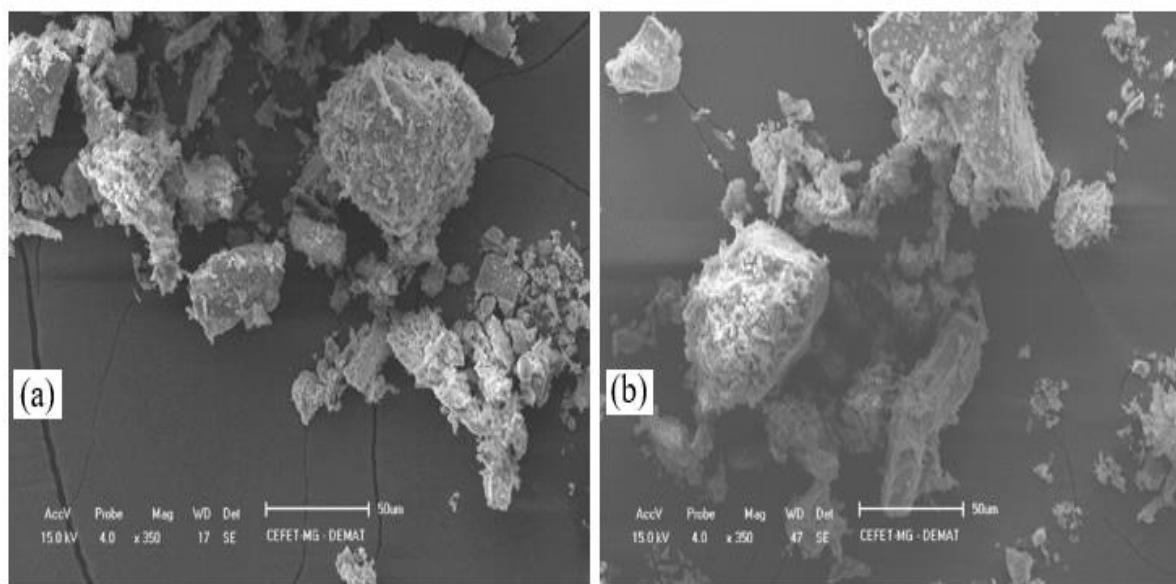
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Química e Mineralógica das Matérias Primas

5.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do rejeito na granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm e na granulometria abaixo de 0,3 mm mostram se bastante semelhante, conforme observado na figura 14 abaixo.

Figura 14 – Microestrutura do Rejeito.



(a) granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm; (b) granulometria abaixo de 0,3 mm

Fonte: Própria Autora.

Pode se notar nas amostras partículas com formatos aproximadamente isométrico e particulares irregulares a angulares. Provavelmente as partículas irregulares a angulares estão associadas à presença dos argilominerais e as de formatos mais arredondados podem estar associadas à presença dos minerais de ferro (ANDRADE, 2014). Outro fato importante que pode ser observado é que a semelhança entre as morfologias e a presença de partículas finas é um indício de que o peneiramento a seco não é o mais indicado para realizar a separação entre o material arenoso, argila e silte que estão presentes nesse rejeito.

5.1.2 Fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX)

A tabela 5 mostra os resultados de FRX para as amostra de rejeito utilizado na produção dos corpos de prova.

Tabela 5 – FRX amostras dos rejeitos.

(a)		(b)	
Composição	Resíduo Mineração (%)	Composição	Resíduo Mineração (%)
SiO ₂	58,6	Fe ₂ O ₃	55,7
Fe ₂ O ₃	35,3	SiO ₂	38,1
Al ₂ O ₃	5,6	Al ₂ O ₃	5,6
Outros Elementos	0,5	Outros Elementos	0,7

(a) granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm; (b) granulometria abaixo de 0,3 mm

Fonte: Própria Autora.

Pode se notar na tabela 5 que o rejeito é constituído basicamente de dióxido de silício, óxidos de ferro e alumínio. Para a granulometria entre 0,3mm e 0,075 mm, nota se a predominância de SiO₂ (58,6%).

Segundo Dias (2017), em sua pesquisa, diz que a predominância desse composto sugere que ele é estável e resistente a ações externas, garantindo matrizes mais duráveis e de melhor desempenho. Sendo assim, possivelmente adequado para substituição como agregado miúdo, uma vez que areia possui grande quantidade de sílica.

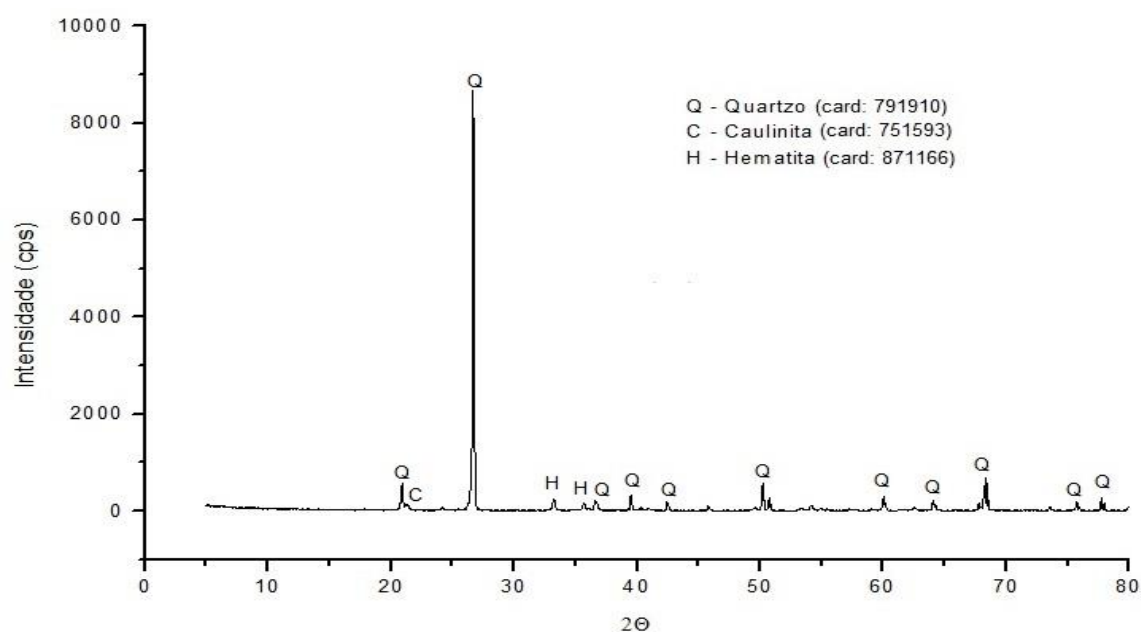
Observa se também a presença de Fe₂O₃ (35,3%) e Al₂O₃ (5,6%), o que pode evidenciar que o peneiramento seco não foi totalmente eficiente para a remoção da argila e silte, uma vez que esses materiais são compostos em sua maior parte, por Fe₂O₃ e Al₂O₃.

De acordo com Souza e Santos (1998) o teor de dióxido de silício (SiO₂) pode estar associado aos silicatos, feldspatos e micas, e o teor de óxido de alumínio e óxido de ferro deve estar associado à presença dos argilominerais, materiais que podem estar contidos nesse tipo de rejeito.

Para o rejeito com granulometria abaixo de 0,3 mm o FRX observa-se a presença do Al₂O₃ (5,6%) e a grande quantidade de Fe₂O₃ (55,7%) indicando que nessa faixa granulométrica, provavelmente, ocorre à elevada presença de argila e silte (SILVA, 2008).

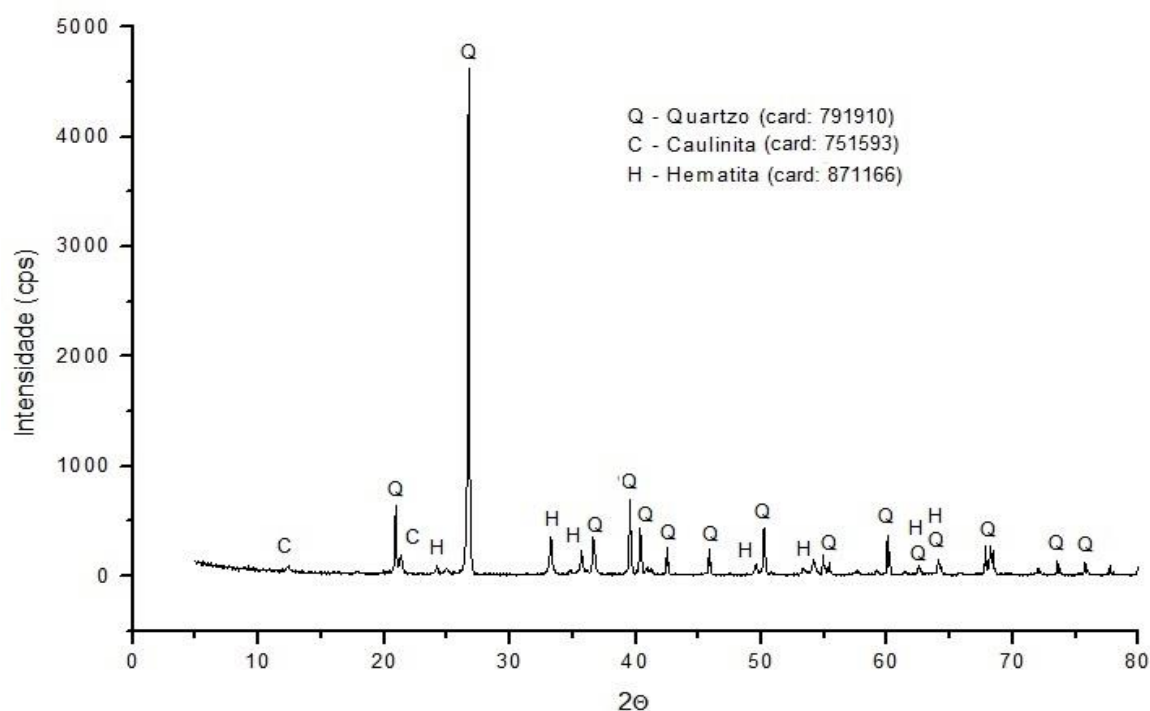
Os resultados de DRX estão apresentados nas figuras 15 e 16. Pode-se observar que as fases presentes são quartzo, caulinita e hematita, esses resultados estão de acordo os estudos realizados por Wolff (2009).

Figura 15 – Difratoograma mostrando as fases presentes na amostra de rejeito com granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm.



Fonte: Própria autora.

Figura 16 - Difratoograma mostrando as fases presentes na amostra de rejeito com granulometria abaixo de 0,3 mm.



Fonte: Própria autora.

Comparando esses resultados pode-se observar que há um indício de maior presença de hematita e caulinita na amostra de rejeito com granulometria abaixo de 0,3 mm (figura 16), isto era esperado uma vez que não teve uma separação do material arenoso da argila mais o silte. Entretanto, esse resultado mostra novamente que o peneiramento seco não foi 100% eficiente na separação desses materiais, devido à presença desses dois elementos também na granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm (figura 15).

Segundo Wolf (2009), para um material ser utilizado como aglomerante esse deve ser granular, quimicamente inerte, não reativo com o álcalis do cimento e ter formas e dimensões adequadas com as características do concreto. Pela alta quantidade de quartzo, que é um material super inerte ao cimento, podemos notar que o rejeito atende a essas especificações como aglomerante.

5.2 Produção dos Corpos de Prova

A figura 17 mostra os corpos de prova que foram produzidos, pode-se observar a uniformidade dos mesmos, bem como nenhuma trinca aparente. Esse resultado mostra que a metodologia adotada na fabricação dos corpos de prova está coerente com a norma utilizada.

Figura 17 – Corpos de Prova moldados.



Fonte: Própria Autora.

5.3 Caracterização Física dos Corpos de Prova

5.3.1 Absorção de Água

A tabela 6 e a figura 18 mostram os resultados obtidos para a absorção de água e a porosidade.

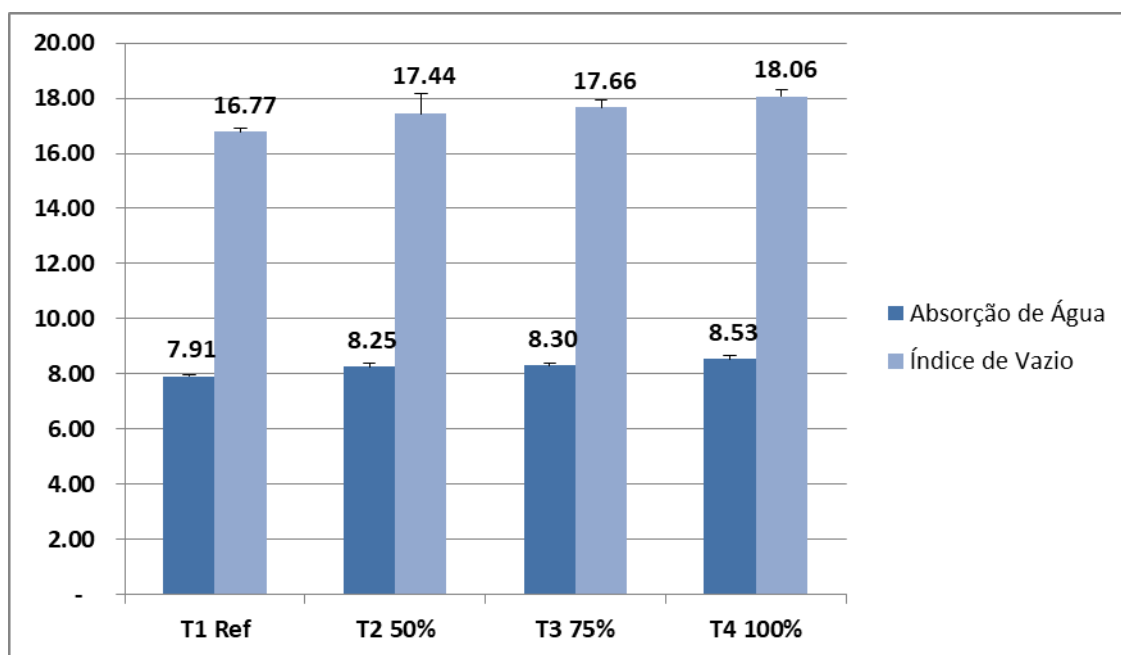
Tabela 6 - Absorção de água e a porosidade.

Traço	Absorção de Água (%)	Índice de Vazio (%)
T1 Ref	7,91	16,77
T2 50%	8,25	17,44
T3 75%	8,30	17,66
T4 100%	8,53	18,06

Fonte: Própria Autora.

Conforme pode se observar na figura 18, com o aumento do percentual de substituição, ocorre um aumento na absorção de água e aumento na quantidade de poros abertos presentes no compósito.

Figura 18 - Absorção de água e porosidade.



Fonte: Própria Autora.

Embora a diferença não seja muito grande em relação à referência, espera-se uma menor durabilidade do concreto. Porém, vale ressaltar que esses resultados estão de acordo com os estudos realizados por Neville (2015), onde o autor relatou que absorção de água inferior a 10% e superior a 5% acarretam em um concreto com melhor durabilidade.

Uma hipótese que pode ser levada em conta para ter ocorrido uma diferença nos valores de absorção de água e na porosidade é que pelo fato do rejeito ser mais fino demanda mais água durante a mistura, o que pode ter prejudicado na trabalhabilidade durante a moldagem da amostra. Com uma trabalhabilidade reduzida, implica em mais poros sendo formada e menos compacta fica o compósito, o que pode levar a maior absorção de água durante a imersão.

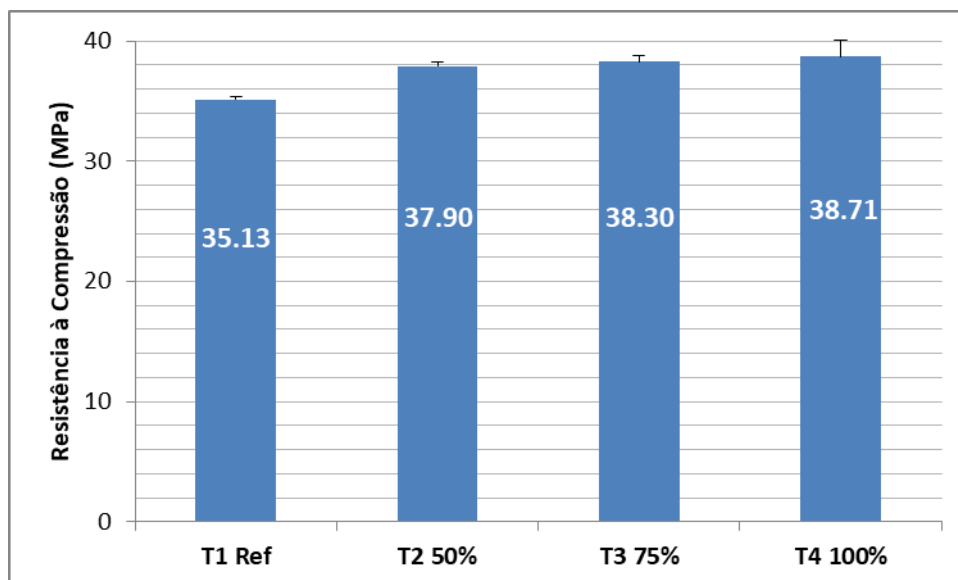
Segundo Magalhães (2007), a determinação dos poros se faz muito necessário, pois o tamanho e a distribuição dos poros determinam a capacidade de absorção dos componentes, o que pode acarretar em danos na estrutura, pois esses poros define a facilidade da água em entrar e sair do mesmo, podendo gerar pressões.

5.4 Caracterização Mecânica

5.4.1 Resistência à compressão

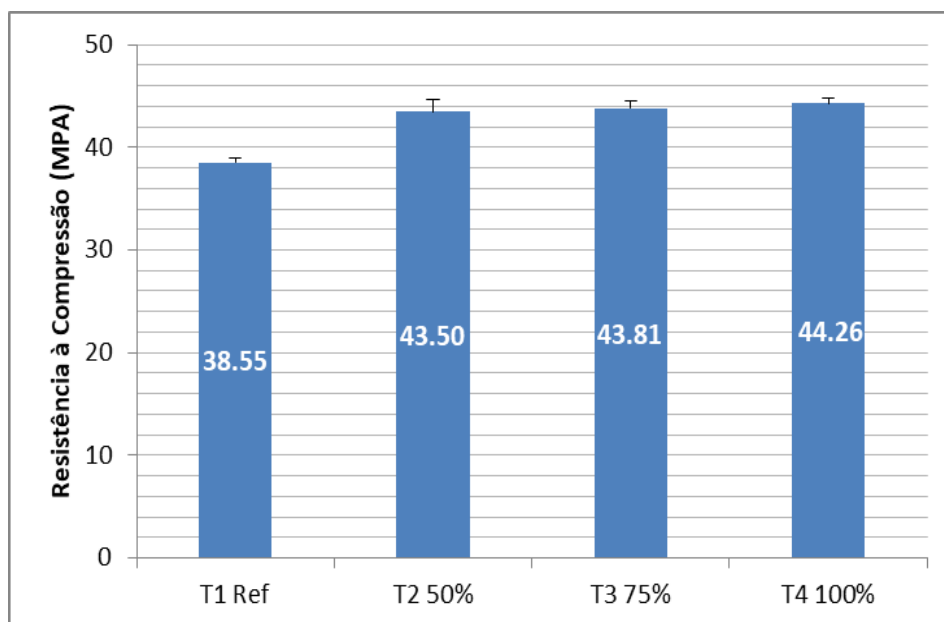
As figuras 19, 20 e 21 mostram os resultados da resistência à compressão dos corpos de prova obtidos com o rejeito na granulometria entre 0,3 mm e 0,075 mm e com substituições da areia fina de 50%, 75% e 100%.

Figura 19 - Resistência à compressão do rejeito de granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm com tempo de cura de 3 dias.



Fonte: Própria autora.

Figura 20 – Resistência à compressão do rejeito de granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm com tempo de cura de 7 dias.

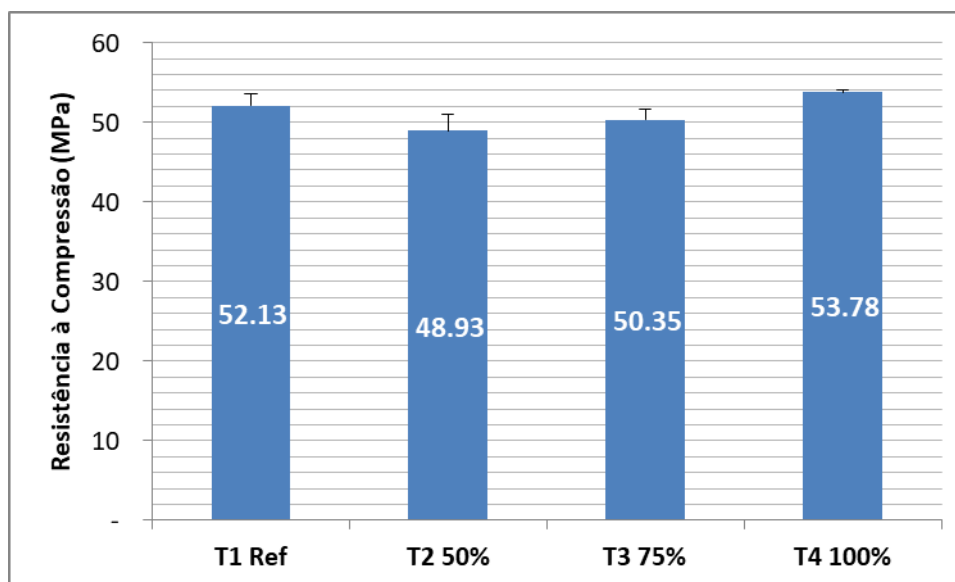


Fonte: Própria autora.

Pode-se observar (figuras 19 e 20) que para os tempos de cura de 3 e 7 dias as substituições obtiveram um melhor resultado do que a referência. O teor de 50% aumenta

cerca de 8% e 13%, para 3 e 7 dias respectivamente. Para 75% tem um aumento de 9% e 14%.

Figura 21 - Resistência à compressão do rejeito de granulometria entre 0,3 mm e 0,075mm com tempo de cura de 28 dias.

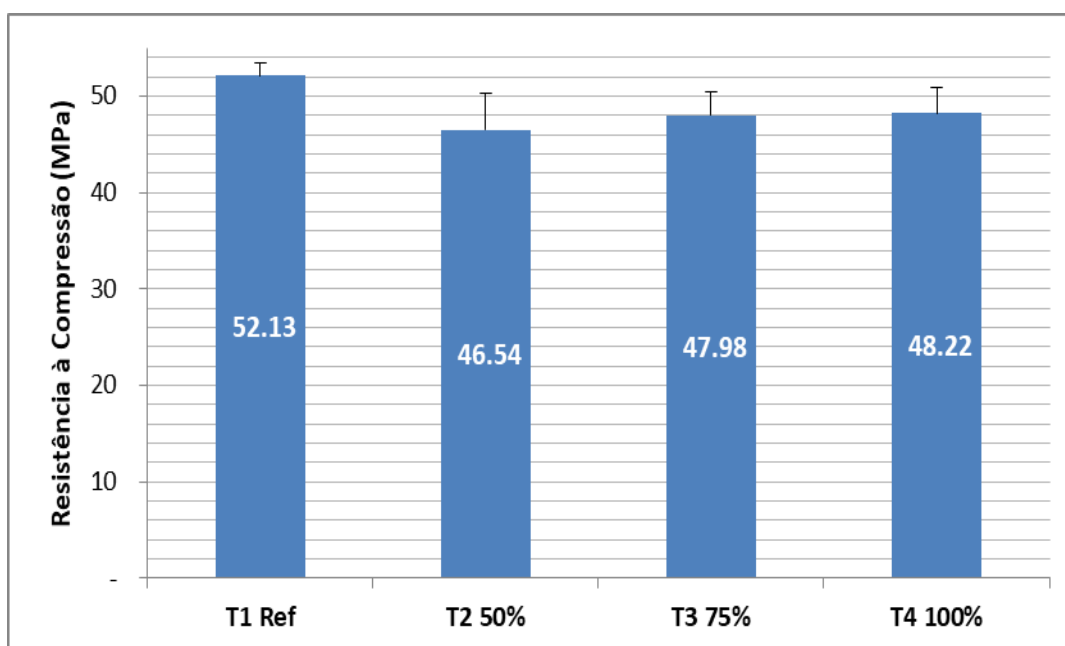


Fonte: Própria Autora.

Entretanto para o tempo de cura de 28 dias (figura 21), nota se que apenas a substituição de 100% da areia fina pelo rejeito obteve um resultado pouco maior, em torno de 3% maior, do que a referência. Observa-se que a substituição de 50% e 75% não superaram a resistência de referência, diminuindo cerca de 6% e 3% respectivamente. Porém devido ao desvio dos corpos de prova esses resultados podem ser bastante semelhantes.

A figura 22 mostra os resultados da resistência à compressão dos corpos de prova obtidos com o rejeito na granulometria abaixo de 0,3 mm, com substituições da areia fina nos teores de 50%, 75% e 100%, e tempo de cura de 28 dias.

**Figura 22 – Resistência à compressão do rejeito com granulometria abaixo de 0,3 mm.–
28 dias.**



Fonte: Própria autora.

Pode-se observar que a presença do silte e da argila no rejeito sugere que ocorre uma influência na resistência a compressão, pois ocorreu uma diminuição de 53,78 Mpa para 48,22 Mpa na resistência para o tempo de cura de 28 dias na proporção de 100% de substituição (figura 21 e 22). Vale ressaltar que todos os resultados estão acima da resistência aceita na norma NBR 7215 para o cimento Portland CPV.

Neto (2006) explica que esse fenômeno ocorre devido a grande quantidade de materiais pulverulentos (argila e silte, granulometria menor que 0,075 mm) que recobrem os grãos dos agregados prejudicando a aderência. Além disso, por tem uma grande superfície específica exige muita água, aumentando assim o fator A/C, acarretando, como observado na figura 22, uma diminuição da resistência de concreto.

6 CONCLUSÕES

A caracterização dos rejeitos nas duas granulometrias trabalhadas se mostrou bastantes semelhantes com relação às fases presentes, ambos são compostos por quartzo, hematita e caulinita. Entretanto, houve uma diferença na composição química, principalmente, nos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , isso ocorreu porque na granulometria entre 0,3 mm e 0,075 mm não era esperado a presença da argila e do silte.

A análise da microscopia eletrônica de varredura mostrou que as amostras apresentaram morfologia semelhante. De acordo com os resultados de caracterização pode-se afirmar que o processo de peneiramento a seco não é o ideal para separar a argila e o silte do material arenoso presente no rejeito.

A absorção de água e porosidade (menores que 10%) está dentro dos padrões aceitáveis para a avaliação da argamassa. O resultado da referência foi melhor que os resultados alcançados com as substituições, indicando que a durabilidade da argamassa produzida com os rejeitos pode ser menor quando os mesmos não são utilizados. Entretanto, como essa diferença foi muito pequena (em torno de 1%) não se pode afirmar com certeza a influência negativa da adição de rejeito de minério de ferro na argamassa.

Os resultados de substituição e tempo de cura mostraram que o rejeito de minério, em ambas as granulometrias, pode ser utilizado na fabricação de argamassa, pois todos os resultados de resistência à compressão estão acima da resistência indicada pela norma NBR 7215 para o cimento Portland CPV. Entretanto, quando a argamassa foi fabricada sem grande quantidade de argila e silte os resultados obtidos foram melhores, com aumento de 3% na resistência para um tempo de cura de 28 dias. Esse resultado indica que a presença de argila e silte no rejeito podem ser prejudiciais à resistência da argamassa.

Diante dos resultados obtidos fica evidente que uma argamassa contendo 100% de substituição da areia fina por rejeito de mineração teria um melhor desempenho, ou seja, uma melhor resistência (38,71 MPa, 44,26 MPa e 53,78 MPa, para 3,7 e 28 dias, respectivamente). Foi observado que os valores, devido aos desvios, se encontram bastante próximos, indicando assim que não ocorreu uma grande influência da adição do rejeito na argamassa. Assim, como os valores estão todos dentro do esperado por norma, esse rejeito se torna possível de ser reaproveitado como agregado miúdo em argamassa.

O reaproveitamento de rejeito de minério de ferro é uma questão de grande relevância, uma vez que ocorrerá uma redução da demanda por recursos naturais primários, além de diminuir os impactos ambientais causados pelo seu descarte. Dentro desse contexto, o

presente estudo mostrou uma alternativa para o seu reaproveitamento em um segmento de grande crescimento, que é o caso da construção civil.

7 TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação da influência deletéria da argila e silte presente no rejeito na produção de concreto;
- Realizar peneiramento a úmido, a fim de retirar os materiais pulverulentos do rejeito;
- Realizar estudos para aplicar o rejeito como aditivo de cimento, testando assim, a sua pozolanicidade;
- Avaliar a relação água/cimento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 2014. 96f Tese (Pós-Graduação) - Universidade Federal de Viçosa, Curso de Engenharia Civil, Viçosa, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10004: Rejeitos sólidos – Classificação**. São Paulo, SP. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos – Especificação**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 - Agregados para concreto, especificação**. Rio de Janeiro, 1982. 9p

ALANAZI, H.; Yang, M.; ZHANG, D.; JERRY, Z. **Bond strength of PCC pavement repairs using metakaolin-based geopolymer mortar**. *Cement and Concrete Composites*. p. 75–82, 2015.

ALBURQUERQUE A. L. S., Turcq B., Fernandes M. A., Ianelli I. C., Cordeiro R. C., Bertaux J. 1999. **Paleoambientes holocênicos da lagoa Dom Helvécio (Minas Gerais)**. In: Congresso Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 7, Porto Seguro (BA), 1999. Resumos expandidos... CD-Rom.

ARAUJO NETO, Gilberto N. **Influência da argamassa de revestimento na resistência à compressão em primas de alvenaria resistentes de blocos de concreto**, p. 20, 2016.

BAUER, Falcão L. A. **Materiais de Construção Civil**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

BRANDT, W. **Avaliação de cenários em planos de fechamento de minas**. In: DIAS, L.E.; MELLO, J.W.V. (Eds.). *Recuperação de áreas degradadas*. Viçosa, MG: UFV/DPS/Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998. p. 131-134.

CALLISTER J.R., W. D. , 2000, **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 589 p. John Wiley & Sons, Inc., 2008.

COPAM (2002), **Dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de rejeitos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais** - Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 17 de dezembro de 2002.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO Filho, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. D. M. R. **Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete**. *Cement and Concrete Research*, p. 110–115, 2009.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Desastre ambiental em Mariana. Disponível em: < g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/2016/02/>. Acesso em: 21 abril 2017.

DIAS, L. L.; MENEGAZZO, A. P. M.; QUINTEIRO, E.; SERAFIM, M. A. Desenvolvimento de um novo produto cerâmico para pavimentação de passeios e áreas públicas. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 4, p.155-165, out. /dez. 2016.

ENDO, I.; NALINI JÚNIOR, E. A.; ALKMIM, F. F.; CASTRO, P. T. A. **Quadrilátero Ferrífero** – Centro de Estudos Avançados. Disponível em: http://www.qfe2050.ufop.br/?pg=o_que_e. Acesso em 5/05/2017.

ESCARIZ, Renata Campos. **Desempenho a compressão e a flexão de compósitos reforçados por fibras de coco**. Tese (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2008.

Espósito, T.J. (2000). **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construída por aterro hidráulico**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 363 p.

FONTES, W. C. **Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

Gama E M, Gomes A M, Vieira C B. **Aproveitamento de capeamento de minas de minério de ferro através de processo de calcinação flash para produção de ligante de alta resistência**. In: 44º Seminário de redução de minério de ferro e matérias primas. Belo Horizonte: 2014 Sep 15 – 18; Belo Horizonte, Brasil;

Gomes , P. C. C. **Estudo de parâmetros que influenciam a produção e as propriedades dos concretos de alta resistência**. Tese Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995

Gomes, R. C. (2009a). **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 220 p.

Guimarães, N.C (2011). **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 129 p.

IBRAM (2011). **Informações e análises da economia mineral brasileira**, 6ª edição. Instituto Brasileiro de Mineração, disponível em <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001669.pdf>. Acessado em 25 de março de 2017.

IBRAM. **Informações sobre a economia brasileira 2015**. p. 1-38, Mariana-MG. 2015.

IERVOLINO, Marcilene. **Tecnologia dos materiais de construção**. Curso técnico de edificações. 3 ed. Suzano, 2012. Disponível em: <http://www.cetes.com.br/professor/edificacao/oes_12011/modulo1/tecnologia_materiais_construcao.pdf > Acesso em: 10 de Março de 2017

KULAIF, Y. **Areia Para Construção Civil**. 2012. Disponível em: . Acesso em: 31 out. 2014

LIMA, L.M.K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. 2006. 125 p. Tese (Mestrado) – Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

MAGALHÃES, A.G. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimento contendo escórias de alto-forno**. Tese de doutorado. Departamento de estruturas, UFMG. Belo Horizonte, 2007.

MANTUANO NETTO, R. M. **Materiais Pozolânicos**. Monografia - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008. 573p.

METHA, P.; MONTEIRO, Paulo J. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

MILONAS, J.G. (2006). **Análise do Processo de Reconstituição de Amostras para Caracterização do Comportamento de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro em Aterro Hidráulico**. Dissertação de Mestrado. Publicação G.DM-148/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146 p.

MONTE, M. B. M., DUTRA, A. J. B., ALBUQUERQUE JR., C. R. F. *et al.* **The influence of the oxidation state of pyrite and arsenopyrite on the flotation of an auriferous sulphide ore.** *Minerals Engineering*, v. 15, p. 1113-1120, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2. ed. São Paulo: Pini, 2015

NITA, C. JOHN, V. M. **Materiais pozolanicos: o metacaulim e a sílica ativa.** Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, 2007

PAIXÃO. C.A.B. **Utilização de refugos de revestimentos cerâmicos (porcelanato e azulejo) em substituição à areia em argamassas cimentícias.** Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2011. 62p. (Dissertação, Mestrado, Ciência e Tecnologia de Materiais).

PETRUCCI, E. G. R., **Concreto de cimento Portland.** São Paulo, 1998.

PIPAL, A. S., KULSHRESTHA A., TANEJA, A. **Characterization and morphological analysis of airborne PM2.5 and PM10.** Agra located in north central India. *Atmospheric Environment*, 2011, v. 45, p. 3621-3630.

PORTAL DE APOIO AO PEQUENO PRODUTOR MINERAL (PORMIM), **Beneficiamento de Minérios, 2008.** Disponível em: http://www.pormin.gov.br/biblioteca/beneficiamento_de_minerio.pdf. Acesso em: 17/06/17

PNRS (Org.). **Política Nacional de Rejeitos Sólidos.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/politica-de-rejeitos-solidos>. Acesso em: 05 jun. 2017.

RESENDE, D. S. de. (2013). **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar.** 2013. 165 f. Tese - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

RODRIGUES, Edmundo. **Agregados.** Livro para o SBEA. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/dau/profs/edmundo/Agregados.pdf> Acesso em: 10 de Maio de 2017.

Russo, F.M. (2007). **Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 295p.

SAMARCO (Org.). **Entenda o Rompimento**. 2015. Disponível em: <<http://www.samarco.com/rompimento-de-fundao/>>. Acesso em: 10 jun. 2017

SERASA EXPERIAN. **Setorise Cimento Março 2014**. Disponível em: <http://d001wwwv06/ambestudospesqaval/analissessoriais/docs/setorise/brasil/Cimento.pdf> Acesso em 16 Jun. 2017 (Acesso Restrito).

SILVA, W. R. Nova metodologia para determinação de propriedades de sedimentação e adensamento de Rejeitos de Mineração. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

SOARES, M. M. N. S. **Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2010.

SNIC. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual de 2009**. Rio de Janeiro. 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/relat2009-10web.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

SNIC. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual de 2017**. Rio de Janeiro. 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/relat2009-10web.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2017.

SOARES, M. M. N. S. **Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2010.

VAN JAARSVELD, J. G. S., VAN DEVENTER, J. S. J., LORENZEN, L. (1997). **The**

Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilise Toxic Metals : Part 1. Theory and Applications. *Minerals Engineering*.

WOLFF, A. P. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da VALE. 2014. 90f. Tese (Mestrado) – Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.