

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

CÁSSIA BARBOSA GOMES

**ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA**  
**PRODUÇÃO DE ADOQUIM**

BELO HORIZONTE

2016

CÁSSIA BARBOSA GOMES

**ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA  
PRODUÇÃO DE ADOQUIM**

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 a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

2016

**CÁSSIA BARBOSA GOMES**

**ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA  
PRODUÇÃO DE ADOQUIM**

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 a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva – Orientador

---

Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

---

Prof. Msc. Luciana Boaventura Palhares

## RESUMO

Este trabalho visa o reaproveitamento do rejeito de minério de ferro proveniente do processo de beneficiamento para a produção de adoquim, um piso cerâmico intertravado com coloração natural e aspecto rústico. A disposição mais barata do rejeito do minério de ferro é em barragens, gerando assim, um acúmulo muito grande do material. Tal acúmulo pode gerar danos ambientais, tal como foi o rompimento da Barragem do Fundão, localizada em Bento Rodrigues/ Mariana-MG. Antes da preparação dos corpos de prova, foi feita a caracterização das matérias-primas por meio de difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para termos de comparação, foram preparados corpos de prova com dois diferentes tipos de argilas e com incorporação de rejeito que chegavam à 100%, sinterizados em duas temperaturas diferentes de queima, à 900°C e 1100°C. As propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova foram analisadas por meio de microscopia óptica, retração linear de queima, absorção de água, resistência à compressão, resistência à flexão e índice de abrasão. Os resultados mostraram que os adoquins produzidos a base de argila e com até 50% de rejeito apresentaram coloração, absorção de água, resistência à compressão, resistência à flexão e índice de abrasão dentro das normas estabelecidas para esse tipo de cerâmica. Assim, esse tipo de rejeito apresenta grande potencial de substituição parcial às argilas em massa cerâmicas para produção de adoquins, que por sua vez podem substituir o pré moldado de concreto, hoje o mais utilizado no Brasil.

Palavras chave: rejeito de minério de ferro, adoquim, caracterização, propriedades físicas e mecânicas e pré moldado de concreto.

## ABSTRACT

This work aims at the reuse of the iron ore tailings from the processing process for the production of cobblestone, an interlocking ceramic floor with natural color and rustic appearance. The cheapest disposal of the iron ore tailings is in dams, thus generating a very large build up of the material. Such an accumulation can generate environmental damages, such as the rupture of the Fundão Dam, located in Bento Rodrigues / Mariana-MG. Before the preparation of the specimens, the raw materials were characterized by X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (FRX) and scanning electron microscopy (SEM). For comparison terms, specimens with two different types of clays with 100% sintering were prepared, sintered at two different firing temperatures, at 900 ° C and 1100 ° C. The physical and mechanical properties of the test specimens were analyzed using optical microscopy, linear burnback, water absorption, compressive strength, flexural strength and abrasion index. The results showed that the clay-based and up to 50% of the rejects presented color, water absorption, compressive strength, flexural strength and abrasion index within the standards established for this type of ceramic. Thus, this type of tailings presents a great potential for partial substitution to the ceramic clay for the production of paving stones, which in turn can replace the precast concrete, nowadays the most used in Brazil..

Keyword: reuse of iron ore, cobblestone, characterized, characterized and precast concrete.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Minas em atividade no Brasil.</b> .....	10
<b>Figura 2 - Evolução da Produção Mineral Brasileira (PMB).</b> .....	11
<b>Figura 3 - Prejuízos causados pela passagem da lama.</b> .....	12
<b>Figura 4 - Figura ilustrativa do adoquim</b> .....	21
<b>Figura 5 - Fluxograma dos materiais e métodos utilizados no trabalho.</b> .....	34
<b>Figura 6 - Trecho do Rio do Carmo onde foi coletada a amostra.</b> .....	35
<b>Figura 7 - Mapa do local da coleta da amostra do rejeito.</b> .....	36
<b>Figura 8 - Molde utilizado para confecção dos corpos de prova.</b> .....	38
<b>Figura 9 - MEV das matérias-primas.</b> .....	45
<b>Figura 10 - DRX da argila Cinza.</b> .....	46
<b>Figura 11 - DRX da argila Terracota.</b> .....	47
<b>Figura 12 - DRX do rejeito.</b> .....	48
<b>Figura 13 - Corpos de prova de argila Cinza com as proporções de rejeito indicadas na figura, após sinterização.</b> .....	49
<b>Figura 14 - Corpos de prova de argila Terracota com rejeito com as proporções indicada na figura, após sinterização.</b> .....	50
<b>Figura 15 - Corpos de prova que sofreram fratura prévia após a sinterização, com composição de 75% e 100% de rejeito, respectivamente.</b> .....	50
<b>Figura 16 - Micrografia das amostras com argilas Cinza e diferentes teores de rejeito.</b> 52	
<b>Figura 17 - Micrografia das amostras com argilas Terracota e diferentes teores de rejeito.</b> .....	53
<b>Figura 18 - Retração linear das cerâmicas queimadas com argila Cinza e diferentes teores de rejeito em função da temperatura de queima.</b> .....	54
<b>Figura 19 - Retração linear das cerâmicas queimadas com argila Terracota e diferentes teores de rejeito em função da temperatura de queima.</b> .....	55
<b>Figura 20 - Absorção de água das cerâmicas queimadas com argila Cinza e diferentes teores de rejeito.</b> .....	56
<b>Figura 21 - Absorção de água das cerâmicas queimadas com argila Cinza e diferentes teores de rejeito.</b> .....	57

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 - Divisão por Empresa/ano da produção nacional de minério de ferro.....</b>	<b>16</b>
<b>Tabela 2 - Produção beneficiada de alguns minerais no ano de 2014.....</b>	<b>16</b>
<b>Tabela 3 - Projeção da produção de rejeito de minério de ferro até 2030. ....</b>	<b>17</b>
<b>Tabela 4- Especificações técnicas de acordo com a norma ASTM 1272/2006 e NTC 5282/2002.....</b>	<b>22</b>
<b>Tabela 5- Especificações técnicas de acordo com a norma ASTM C902/2006 e NTC 3829/2002.....</b>	<b>23</b>
<b>Tabela 6 - Formulações utilizadas para a preparação das amostras.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabela 7 - Tabela com a distribuição de tamanho das partículas das matérias-primas..</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 8 - Resultado do FRX das matérias-primas do adoquim .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 9- Valores de resistência à compressão obtidos para cada formulação.....</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 11 - Dados de índices de abrasão.....</b>	<b>60</b>

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVO.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos .....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 Mineração de Ferro e os Rejeitos Provenientes do seu Beneficiamento .....	15
3.2 Reaproveitamentos de Rejeitos de Minério de Ferro.....	19
3.3 Adoquim .....	20
3.3.1 Secagem e sinterização do adoquim.....	25
3.4 Técnicas de Caracterização.....	27
3.4.1 Amostragens.....	27
3.4.2 Análises granulométrica.....	28
3.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	29
3.4.4 Microscópio Óptico (MO).....	29
3.4.5 Difração de raios X (DRX) .....	29
3.4.6 Fluorescência de raios X (FRX).....	30
3.5 Ensaio Mecânicos.....	31
3.5.1 Ensaio de compressão .....	31
3.5.2 Ensaio de flexão .....	31
3.5.3 Retração linear de queima .....	31
3.5.4 Absorção de água .....	32
3.5.5 Índice de abrasão.....	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.2 Amostragem.....	35
4.3 Caracterizações das Amostras.....	36



4.3.1	Análise granulométrica .....	36
4.3.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	37
4.3.3	Difração de raios X (DRX) .....	37
4.3.4	Fluorescência de raios X (FRX).....	37
4.4	Preparações das Formulações dos Adoquins .....	37
4.4.1	Processamento dos adoquins.....	38
4.5	Sinterização.....	39
4.6	Determinações das Propriedades Físicas e Mecânicas .....	39
4.6.1	Microscópio Óptico.....	39
4.6.2	Retração linear (Rq) .....	40
4.6.3	Absorção de água (AA).....	40
4.6.4	Resistência à compressão (RC).....	40
4.6.5	Ensaio de flexão .....	41
4.6.6	Índice de abrasão.....	42
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1	Caracterização química e Mineralógica das Matérias-Primas.....	43
5.1.1	Análise granulométrica .....	43
5.1.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	44
5.1.4	Difração de raios X – DRX.....	45
5.2	Análise visual.....	48
5.3	Caracterização Física dos Corpos de Prova.....	51
5.3.1	Microscópio óptico (MO).....	51
5.3.2	Retração linear.....	54
5.3.3	Absorção de água .....	56
5.4	Caracterização Mecânica .....	57
5.4.1	Resistência à Compressão (RC).....	57
5.4.4	Ensaio de Flexão .....	59

5.4.5 Índice de abrasão .....	59
6. CONCLUSÕES .....	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade econômica fundamental para o desenvolvimento de um país que envolve um conjunto de processos, atividades e técnicas essenciais para a extração de bens minerais da crosta terrestre (SANTOS *et al*, 2012). A produção mineral no Brasil é expressiva: são 8400 minas em operação (Figura 1) que abrangem uma produção de 72 substâncias minerais das quais 23 são metálicas, 45 não metálicas e 4 energéticas (IBRAM, 2015).

**Figura 1- Minas em atividade no Brasil.**

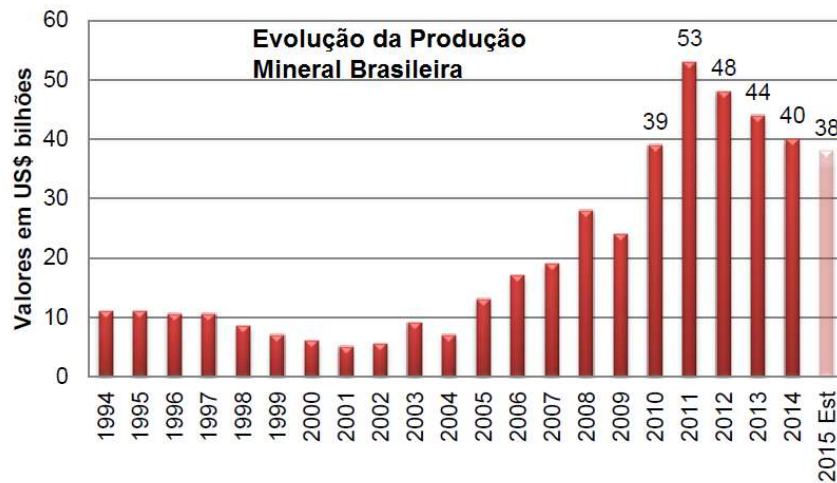


Fonte: (IBRAM, 2015)

Sabe-se que a produção mineral brasileira gera lucros, como pode-se observar na Figura 2. Em 2014 foram gerados lucros de US\$ 40 bilhões, enquanto que em 2015 foi estimada uma geração de lucro de US\$ 38 bilhões (IBRAM, 2015). Mas, em contrapartida, a atividade mineradora traz consequências graves ao meio ambiente pois gera muitos rejeitos devido à extração de um grande volume de material rochoso e, conseqüentemente, altera o equilíbrio ambiental, uma vez que a disposição final dos mesmos, na maior parte das vezes, é inadequada (FARIAS, 2002).

Esses impactos causados pela mineração são agravados principalmente quando as áreas mineradas são próximas às áreas urbanas (DIAS, 2001). Dentre os impactos gerados pela extração de minério, destaca-se a geração de rejeitos originários dos processos de beneficiamento (PEREIRA, 2005).

**Figura 2 - Evolução da Produção Mineral Brasileira (PMB).**



Fonte: (IBRAM, 2015)

O processo de beneficiamento consiste de operações de britagem, lavagem e peneiramento, a que se submetem os minérios, visando a redução e homogeneidade da granulometria dos grãos, eliminação dos minerais associados e melhoria da qualidade do produto final. Na sua composição apresentam partículas de rocha, água e as substâncias químicas envolvidas no processo de beneficiamento (SANTOS *et al.*, 2012).

Por ter um baixo custo, a construção de barragens de rejeitos é o procedimento mais implementado pelas mineradoras. As características e o tipo de barragem dependem do tipo de rejeitos. Rejeitos na forma de lamas, cuja granulometria se assemelha à das argilas, geralmente são dispostos em barragens convencionais, semelhantes às barragens de contenção de água, mas construídas com solo argiloso ou em enrocamento com núcleo argiloso, onde se faz a deposição do material, podendo ocasionar uma série de agressões à fauna e flora local (MENEZES *et al.*, 2002).

Considerada a maior catástrofe ambiental do país, o rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro da Mineradora Samarco, em Mariana-MG, causou um impacto socioeconômico de mais de R\$1,212 bilhões, afetando 35 cidades mineiras e 4 capixabas, deixando 19 vítimas fatais. Mais de 62 milhões de metros cúbicos de lama de rejeito de minério vazaram da Barragem de Fundão. Especialistas que avaliaram o solo de toda região concluíram que as áreas não estão mais aptas para o desenvolvimento da agropecuária, pois a lama que recobriu a região não tem nutrientes para o plantio (AGÊNCIA BRASIL, 2015). Além da piora na qualidade da água, mortandade de peixes e da vida aquática, o desastre ainda afetou a pesca e outras atividades econômicas ligadas ao rio e ao mar (IBAMA, 2015). As figuras a seguir ilustram alguns dos prejuízos do desastre.

**Figura 3 - Prejuízos causados pela passagem da lama.**



(a)

(b)



(c)

(a) Bento Rodrigues após o desastre; (b) Mortandade de peixes no rio e mar; (c) Mar de Linhares tomado pela lama

Fonte: (a) <http://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/2016/02/>  
 (b) <http://epocanegocios.globo.com/Brasil/noticia/2015/11/pescadores-do-espírito-santo-entramna-justica-para-pedir-indenizacao.html>  
 (c) <http://www.portaltenponovo.com.br/onu-critica-governo-vale-e-bhp-por-catastrofe-da-lama-de-minerio/>

Dentro desse contexto, este trabalho visa à reutilização do resíduo proveniente do beneficiamento de minério de ferro, que se acumula nas barragens para a produção de adoquim (ou piso intertravado cerâmico), um produto inovador e de elevado valor agregado e também uma alternativa a utilização de concreto (CANDIDO, 2013). Além disso, a fabricação do intertravado (blocos que resistem a movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical,

horizontal ou de rotação em relação a seus vizinhos (PORTLAND, 2010)) de cerâmica é uma possibilidade de se introduzir no mercado um produto com características desejáveis como coloração natural exuberante, elevada resistência mecânica, fácil manejo, facilidade de aplicação e baixo custo de manutenção (MALPESA, 2016).

## **2. OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho teve como objetivo estudar a reutilização do rejeito de minério de ferro proveniente de barragens de minério para produção de adoquim.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- 1- Coletar as amostras e caracterizá-las em relação à composição química e mineralógica;
- 2- Definir as massas cerâmicas para produção de adoquins;
- 3- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos adoquins;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Mineração de Ferro e os Rejeitos Provenientes do seu Beneficiamento

O Brasil foi o terceiro maior produtor do mundo no ano de 2014, produzindo cerca de 411 milhões de toneladas de minério de ferro, sendo o estado de Minas Gerais o principal produtor (JESUS, 2015). Além disso, as projeções indicam que a produção poderá dobrar em alguns anos. A consequência desse aumento está diretamente relacionada ao aumento da geração de rejeitos de minério proveniente do seu beneficiamento, que também poderá duplicar em alguns anos, exigindo cada vez mais o desenvolvimento de novas tecnologias de reaproveitamento (CAMPANHA, 2011).

Em termos de produção brasileira, em 2014, a produção foi de 411,8 milhões de toneladas com um teor médio de 63,5%, o que representou um aumento de 6,4% em comparação a 2013. O principal produtor foi o estado de Minas Gerais cuja produção representou 68,4% desse total. Segundo Jesus (2015), as reservas brasileiras com teor médio de 55,5% de ferro representam 12,8% das reservas de todo o mundo, o que mostra a grande importância do país no setor mineral e também a importância da mineração na economia brasileira. Na Tabela 1 é mostrada a divisão por Empresa/ano da produção brasileira de minério de ferro.

De acordo com Santos *et al* (2012) para a obtenção do concentrado de ferro o minério é submetido a etapas sucessivas de peneiramento, britagem, moagem, deslamagem e flotação em colunas, a maioria delas envolvendo água. Por isso geralmente os rejeitos de minério de ferro apresentam-se na forma de polpas, constituídas por uma fração líquida e uma sólida com diferentes minerais em suspensão e elementos químicos dissolvidos. Para cada tonelada de minério de ferro é produzida em média 0,5 toneladas de rejeitos, sendo a razão gravimétrica entre o produto final e os rejeitos produzidos de 2:1 (BOSCOV, 2008).

Silva *et al*, (2011) realizou um levantamento estatístico (Tabelas 2 e 3) sobre a quantidade dos principais minerais beneficiados no ano de 2014, bem como a projeção da produção de rejeitos de minério de ferro até 2030. Observa-se na Tabela 3 a produção de ferro em 2014 foi de 411 milhões de toneladas e, como consequência disso, a produção de rejeito devido a seu beneficiamento foi de 213,4 milhões de toneladas. Esse levantamento estatístico mostra a importância do estudo sobre o reaproveitamento deste material, visto que o montante gerado associado ao seu descarte inadequado pode acarretar inúmeras consequências negativas para o meio ambiente.



**Tabela 1 - Divisão por Empresa/ano da produção nacional de minério de ferro**

Empresa	Produção por Ano	
	2012	2015
Vale	360.000	425.000
CSN	30.000	89.000
Samarco	24.000	30.500
Ferrous Resources	3.000	23.000
MMX	13.000	42.500
Usiminas	12.000	29.000
Anglo American	5.500	35.000
Mineração Corumbaense	5.000	10.000
Acelor Mital	4.300	15.000
V&M	5.000	5.000
Mhag	1.000	12.000
Bahia Mineração	-	20.000
Outros	-	17.000

Fonte: Adaptado de IBRAM, 2015.

**Tabela 2 - Produção beneficiada de alguns minerais no ano de 2014.**

Substância (t)	Prod. Beneficiada (em milhões de ton.)
Ferro	411,1
Calcário	0,34
Titânio	0,08
Fosfato/Rocha fosfática	6,5
Alumínio/Bauxita	35,4
Ouro	0,08
Cobre	0,24
Manganês	0,002
Caulim	2,1
Zinco	0,25

Fonte: (JESUS, 2015).

**Tabela 3 - Projeção da produção de rejeito de minério de ferro até 2030.**

Ano	Produção de rejeito de minério de ferro (em milhões de toneladas.)
2014	213,4
2015	220
2016	224,9
2017	229,3
2018	231,5
2019	235,2
2020	237,4
2021	241,9
2022	244,4
2023	246,6
2024	248,9
2025	251,9
2026	254,4
2027	257
2028	260
2029	262,9
2030	265,5
Total	4721,2

Fonte: (SILVA, *et al*, 2011).

O rejeito do minério de ferro é constituído basicamente por sílica e finos de hematita, com granulometria similar à da areia fina. Devido à alta concentração de matéria sólida destes rejeitos, acumula-se nas barragens uma grande quantidade de sedimentos, podendo esgotar, em pouco tempo, todo o seu volume de reserva. (ALMEIDA & LOUREIRO, 2008).

A valorização desses rejeitos como matérias-primas secundárias na produção de materiais para pavimento, por exemplo, podem aliviar os problemas associados ao esgotamento dos recursos naturais e diminuir o seu descarte (ROMERO, *et al*, 2008). Diversos estudos na área com foco no desenvolvimento de misturas argila/resíduo a fim de obter um material cerâmico comercializável mostraram muitos benefícios, tais como:

- i) preservação de recursos, matérias-primas e energia;
- ii) efeitos positivos sobre o processo de fabricação de tijolos;
- iii) melhorar a qualidade do produto final;
- iv) redução do custo do produto final devido à utilização de resíduos de determinado processo.

Segundo Lozano (2006), as formas de disposição de rejeitos são as seguintes: disposição a céu aberto, de forma subterrânea ou subaquática. As disposições subaquáticas não mais utilizadas devido ao grande dano ambiental que ela pode provocar aos ecossistemas aquáticos. As subterrâneas são realizadas em cavas que ficam abertas após a extração do minério. O método de disposição mais utilizado é a céu aberto, o rejeito é disposto em pilhas ou em estruturas de contenção, que são denominadas de barragens (MOTTA, 2008).

Segundo Assis (1995), barragens de rejeitos são estruturas que possuem a função de reter as lamas geradas nos processos de beneficiamento do minério e devem ser uma estrutura estável e segura. O rejeito deve ser contido em sua totalidade em seu reservatório e o controle da água percolada deve ser bem executado, a fim de garantir a não ultrapassagem da capacidade limite do reservatório.

Entre os métodos de construção de barragens, cita-se o estudo realizado por Victorino (2007), nesse estudo foi utilizado o próprio rejeito proveniente do beneficiamento para a construção da barragem. Esse método construtivo foi considerado viável, pois os custos envolvidos são bem distribuídos ao longo do tempo e flexibiliza a operação mineradora. Vale ressaltar que existem outros métodos de construção, tais como: método de linha de centro, método de jusante e método de montante (ABRAÃO, 1985).

Entretanto, qualquer método que for adotado, a análise de risco da segurança das barragens deve ser feita cuidadosamente e com transparência pela mineradora. A segurança deve ser obrigatoriamente um critério prioritário quando da construção de uma barragem. É ilógico priorizar a redução de custos em detrimento da segurança das barragens, pois caso ocorra um acidente o prejuízo econômico seria enorme. A ruptura de uma barragem de rejeito pode causar uma série de impactos negativos à população vizinha, ao meio ambiente e à economia da região (PASSOS, 2009).

O Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais (Ano 2014), elaborado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), mostrou que 8% das 730 estruturas de contenção de rejeitos no estado de Minas Gerais não têm as necessárias condições de segurança declaradas pelos auditores dos empreendimentos. Além disso, outras não dispõem de

informações técnicas suficientes para esse tipo de garantia. O relatório ainda apresenta uma classificação de potencial de danos ambientais. Das 730 barragens em Minas, 224 estão na classe III, o que é considerado de alto potencial de dano ambiental, incluindo a do Fundão em Bento Rodrigues, que se rompeu em novembro de 2015. Outras 305 se enquadram na classe II, que indica potencial médio de dano ambiental e 201 na classe I, considerado de baixo potencial (CRUZ, 2015).

### **3.2 Reaproveitamentos de Rejeitos de Minério de Ferro**

Os rejeitos de mineração são 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. A porcentagem dos rejeitos incorporados às matrizes cerâmicas pode variar entre 10 e 60% causando ligeiras mudanças nas propriedades mecânicas, retração e absorção de água (MENEZES, *et al.*, 2002). Embora os rejeitos sejam definidos como redutores de plasticidade, não necessariamente atuam apenas reduzindo a plasticidade das massas cerâmicas, podendo atuar também como agentes formadores de fase vítrea. Em muitos casos, este é um fator de grande relevância no sucesso do uso desses rejeitos na produção de tijolos, revestimentos e produtos de baixa absorção de água (produtos com grande valor agregado), evidenciando-se que a fase vítrea formada pode atuar na função de preencher os espaços vazios do material ou como matriz vítrea ligante de grãos cristalinos (MENEZES, *et al.*, 2002).

Chaves (2009) elaborou um estudo sobre a análise da incorporação de rejeitos de minério de ferro proveniente do município de Jucurutu, no estado do Rio Grande do Norte, em argilas com a intenção de avaliar as modificações provocadas nas propriedades físicas e mecânicas das argilas após esta assimilação. Avaliou-se também a porcentagem de rejeitos de minério de ferro que otimiza ou mantém as características e propriedades tecnológicas da argila. Variando as proporções de rejeitos de minério de ferro e de argila, verificou-se 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, que representa um enorme problema para as mineradoras na atualidade.

Campanha (2011) realizou em seu estudo a caracterização de rejeitos de minério de ferro com o objetivo de verificar a aplicabilidade de seu uso em pavimentação. Nesse estudo foram caracterizados dois tipos de rejeitos, um proveniente do processo de flotação e o outro do

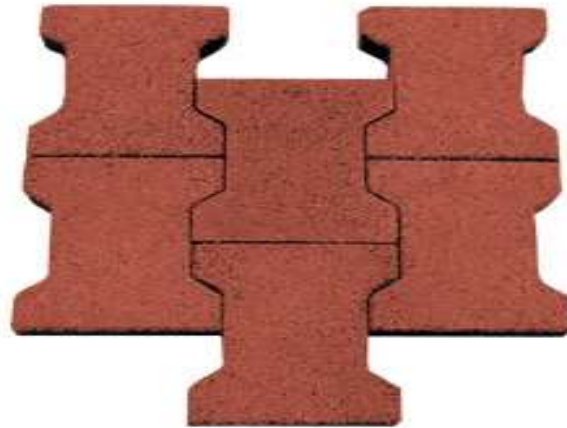
processo de separação magnética, conhecida também como jigagem. Foram executados uma série de ensaios como o ensaio granulométrico, ensaio de compactação, de compressão, difração de raios X, dentre outros. Seus resultados expressaram que as composições granulométricas de ambos os tipos de rejeitos são compatíveis para seu emprego como materiais para sub-base ou base em solos cimento. Além disso, concluiu-se que os rejeitos de minério de ferro apresentaram enorme potencial para utilização em asfaltos e pavimentos, principalmente quando é adicionado a eles, o cimento.

Nociti (2011) avaliou a viabilidade da adição de uma quantidade de rejeito de minério de ferro na massa cerâmica, mantendo suas propriedades e minimizando um problema ambiental. Foram estudados dois tipos de rejeito de minério de ferro, um rejeito de granulometria maior (arenoso) e outro de granulometria menor (argiloso). A caracterização foi realizada utilizando técnicas como a fluorescência de raios X, difração de raios X, análise granulométrica e algumas análises térmicas. Para determinar o teor de rejeito incorporado à massa cerâmica fez-se necessário os ensaios de liquidez e de plasticidade, e observou-se que os teores de rejeito que apresentaram resultados mais próximos aos de uma massa cerâmica convencional foi de 7,5% de rejeito arenoso e 5% de rejeito de lama. Após análise dos resultados de todos os ensaios, a autora pode concluir que a adição de rejeitos nas quantidades adequadas permite a fabricação de blocos cerâmicos para vedação, ou seja, sem função estrutural.

### **3.3 Adoquim**

O pavimento rústico cerâmico adoquim, obtido a partir de uma mistura de argilas naturais com materiais não plásticos, é um produto cujas principais características são, entre outras, sua coloração natural e aspecto rústico (MALPESA, 2016). O adoquim é pequeno e de fácil manejo, suas formas geométricas foram desenvolvidas não só para obter facilidade de instalação, mas também para uma correta distribuição de cargas impostas pelos diversos tipos de tráfego. Suas geometrias permitem uma diversidade de combinações, proporcionando um ambiente com uma estética harmoniosa. Os adoquins permitem a pavimentação de estradas para todos os tipos de tráfego, calçadas, zonas de pedestres, pátios e jardins, dentre outros (CONARSA, 2016). A Figura 4 ilustra o material e nota-se sua cor característica e o aspecto rústico.

**Figura 4 - Figura ilustrativa do adoquim**



Fonte: <http://www.ecovilaesort.com.br/noticia.php?cod=151>

De acordo com a empresa Conarsa, as vantagens de se produzir adoquim são:

- A colocação do adoquim é feita de maneira simples não requerendo assim um grande maquinário, podendo ser até realizada manualmente. De acordo com a empresa Conarsa, que já produz adoquim, para automatizar o processo estão sendo desenvolvidos equipamentos, reduzindo assim o tempo de colocação.
- Podem ser realizadas pavimentações parciais, eliminando assim os problemas de continuidade nos pavimentos;
- Após a pavimentação utilizando o adoquim, o trânsito pode ser liberado imediatamente depois do mesmo ter sido implementado;
- Permite a pavimentação tanto em áreas de tráfego pesado e tráfego leve;
- Permite criar desenhos e combinar formas e cores melhorando assim a estética do ambiente, usos diferenciados (separar a área de estacionamento da área de trânsito, em uma rua) e oferecer funcionalidades (área de trânsito de pedestres);

Por possuir essas vantagens atrativas, países como Espanha, Colômbia e Estados Unidos já utilizam o adoquim como substituinte do pré moldado de concreto (PPC) em pavimentos. Nos países citados, existem normas como a UNE-NE (Espanha), NTC (Colômbia) e ASTM (Estados Unidos), que visam determinar as especificações tecnológicas para a produção do adoquim (CANDIDO, 2012). O Brasil é um país tropical e não apresenta variações climáticas tão significativas como os países citados, que apresentam invernos rigorosos. Por esse motivo, e também por esse produto apresentar-se como uma alternativa para a pavimentação

intertravada, é interessante a elaboração de uma norma técnica brasileira que especifique as características técnicas aceitáveis para sua produção (CANDIDO, 2012).

As normas da ASTM C1272/2006 (Estados Unidos) e a NTC 5282/2002 (Colômbia) especificam a utilização do adoquim em ambientes externos com tráfego veicular pesado ou em calçadas com tráfego de alta circulação de pedestres (CARVALHO, 2015). Nessa norma o adoquim é classificado como Tipo R (rígido) ou Tipo F (Flexível), ou seja, de acordo com o tipo de base onde o adoquim será depositado. A Tabela 4 apresenta as especificações tecnológicas da ASTM e NTC para o adoquim cerâmico.

**Tabela 4- Especificações técnicas de acordo com a norma ASTM 1272/2006 e NTC 5282/2002.**

Normas		Especificações técnicas		
ASTM		Absorção de água (%)	Resistência à compressão (MPa)	Índice de Abrasão
C1272	Tipo R	6	55,2	0,11
C1272	Tipo F	6	60,7	0,11
NTC				
5282	Tipo R	6	55	0,11
5282	Tipo F	6	69	0,11

Fonte: Adaptado CARVALHO, 2015.

O adoquim rígido (tipo R) pode ser depositado de duas maneiras:

- sobre uma camada de argamassa ou apoiados em uma base de concreto;
- depositados sobre o asfalto e apoiados sobre uma base de asfalto ou concreto;

O Tipo F pode ser depositado sobre uma base de areia com juntas também de areia e apoiados por uma base adequada, conformada por materiais granulares compactados.

Já a ASTM C902/2006 e a NTC 3829/2002 (Tabela 5) estabelecem a utilização do adoquim cerâmico em locais externos, com um tráfego veicular leve e calçadas com baixa, média e alta circulação de pedestres (CANDIDO, 2012).

**Tabela 5- Especificações técnicas de acordo com a norma ASTM C902/2006 e NTC 3829/2002**

Normas		Especificações técnicas		
ASTM		Absorção de água (%)	Resistência à compressão (MPa)	Índice de Abrasão
C902	SX	8	55,2	-
C902	MX	14	20,7	-
C902	NX	Sem limite	20,7	-
NTC				
3829	Tipo I	8	55,2	0,11
3829	Tipo II	14	38	0,25
3829	Tipo III	Sem limite	20,7	0,50

Fonte: Adaptado CARVALHO,2015.

A norma americana ASTM C902/2006 classifica o adoquim de acordo com o clima que o material será exposto. Em um clima que o material será exposto ao congelamento, utiliza-se o adoquim do tipo SX. O tipo MX é indicado onde o material não será exposto ao congelamento, como no Brasil. O tipo NX é indicado para uso em ambientes fechados, que não sofrerão mudanças climáticas (CARVALHO, 2015).

Diferente da norma americana, a norma colombiana NTC 3829 classifica o adoquim de acordo com o tráfego de pedestres, que pode ser alto (Tipo I), médio (Tipo II) ou baixo (Tipo III) (CARVALHO, 2015). Um tráfego de pedestres considerado alto é aquele onde possui alta circulação de pedestres e o adoquim estará exposto à uma alta abrasão, como em edifícios públicos e comerciais, sofrendo assim um desgaste maior. Um tráfego de médio porte, como em parques e calçadas, fará com que o adoquim seja exposto a uma média abrasão. Utilizando o adoquim em quintais de casa ou área de lazer, o mesmo será exposto a uma baixa abrasão e será considerado como Tipo III (CARVALHO, 2015).

O produto que já possui um mercado sólido no Brasil é denominado de pré moldado de concreto (PPC). A norma que regulamenta as especificações técnicas para a produção desse material é denominada de ABNT 97810/1987. Essa norma exige que o PPC possua resistência à compressão maior ou igual a 35MPa para locais que possuem tráfego leve e maior ou igual a 50 MPa para locais de tráfego pesado.

Candido (2012) desenvolveu uma massa cerâmica com argilas caulínicas, chamote e argilite visando à obtenção de pavimento intertravado tipo adoquim. A argila caulínica era



proveniente da região de Campos dos Goytacazes, RJ, o chamote é um resíduo industrial descartado após a queima do material cerâmico e o argilito é um material comumente empregado na fabricação de telhas e blocos cerâmicos na região de Itú, SP. Foram preparadas quatro amostras, onde a primeira continha 50% de argila forte e 50% de argila fraca, a segunda continha 50% em peso de argila (25% de argila forte e 25% de argila fraca) e 50% em peso de argilito, a terceira continha 45% (22,5% de argila forte e 22,5% de argila fraca) de argila, 50% de argilito e 5% de chamote e a quarta continha 40% de argila (20% de argila forte e 20% de argila fraca), 50% em peso de argilito e 10% em peso de chamote. Os resultados indicaram que o argilito reduziu significativamente a absorção de água e a retração das composições. O chamote por apresentar uma granulometria mais grosseira do que a argila pode melhorar o grau de empacotamento da cerâmica. Além disso, devido à morfologia das partículas, contribui significativamente para facilitar a etapa de secagem, pois aumenta a permeabilidade da cerâmica. A melhor formulação obtida foi a que continha 50% de argila e 50% de argilito.

Carvalho (2015) também desenvolveu um tipo de adoquim constituído de argila, areia e resíduo de rocha ornamental. Este resíduo é produzido a partir de blocos que foram extraídos de pedreiras e passaram por um processo de serragem e beneficiamento até tornarem-se “lajinhas” que serão vendidas com fins ornamentais para serem aplicadas como revestimentos e elementos decorativos. Durante a serragem das lajes, é produzida uma lama composta de resíduo de rocha e água. Esta lama é encaminhada para tanques de decantação e posteriormente a água volta a ser utilizada para a serragem de novas lajes e o resíduo de rocha torna-se disponível para ser utilizado na fabricação de adoquim. Foram preparadas pela autora quatro massas cerâmicas que continham de 0 a 30% em peso de resíduo de rocha ornamental. O adoquim que continha 30% em peso de resíduo apresentou melhores resultados de resistência mecânica que os demais. Isso se deve ao fato do mesmo possuir partículas mais finas que a areia, possibilitando um melhor empacotamento. De acordo com as normas internacionais todas as massas são indicadas para confecção de adoquins de tráfego leve e admitidas em ambientes internos e expostos à baixa abrasão. A massa que continha 30% em peso de resíduo aproximou-se muito dos resultados aceitáveis para adoquins indicados também para áreas externas e de abrasão intermediária.

Pinheiro (2012) propôs a formulação de um adoquim onde se misturou dois tipos de argila do município de Campos dos Goytacazes, provenientes de jazidas da Cerâmica Stilbe e o argilito, em forma de pó, da região de Itú – SP, usado para fabricação de cerâmica estrutural. Foram feitas cinco formulações, a primeira continha apenas massa argilosa (mistura composta

por 50% argila forte e 50% argila fraca, ambas da Cerâmica Stilbe), a segunda formulação misturava uma massa argilosa (75% em peso) e argilito (25% em peso), a terceira formulação continha 50 % de massa argilosa e 50% em peso de argilito, a quarta formulação que continha apenas argila forte (100% em peso) e a quinta formulação continha 50% em peso de argila forte e 50% em peso de argilito. O teste industrial mostrou que, segundo a norma brasileira, todas as formulações atendem aos requisitos técnicos e, portanto, são indicadas para a produção de adoquim em escala industrial, para vias de tráfego de pedestres.

### ***3.3.1 Secagem e sinterização do adoquim***

#### *Secagem*

De acordo com Lehmkuhl (2004), a secagem é uma das etapas mais importantes para a fabricação de um material cerâmico. Isso se deve ao fato de que, nessa etapa, tem-se a retração ou não do material e evaporação de uma grande quantidade de água que constitui a amostra.

Com o fornecimento de energia ao material cerâmico ocorre a redução da quantidade de água no seu interior. Deste modo, a etapa de secagem é considerada um processo termodinâmico. Dependendo da composição do material e da quantidade de água presente no mesmo, a difusão da água ocorrerá de dentro para fora, na forma de líquido e/ou vapor. Para se obter as condições ideais no processo, como mínima perda do material e baixo consumo de energia, é importante fazer o controle da quantidade de água que a massa irá perder e o quanto restou e também do mecanismo de difusão (SANTOS, *et al*, 2003).

Para a obtenção de uma massa plástica é essencial o uso da água para a conformação do material (VIEIRA, *et al*, 2003). A secagem, etapa posterior a conformação, é normalmente realizada em galpão ou estufa, sendo a secagem em galpão mais utilizada pelas oficinas de ceramistas. A variação da dimensão do sólido podem chegar em até 5% do valor inicial, não afetando assim a resistência mecânica necessária à peça em etapas posteriores à secagem (SOARES, *et al*, 2004).

O processo de secagem pode ser dividido em quatro fases: adaptação do produto ao ambiente ao qual é submetida, saída da água coloidal, formação de vazios e expulsão da umidade intersticial (HARTKE, 2003).

De acordo com Hartke (2003), na primeira fase o produto está ainda adaptando ao seu novo estado de temperatura e pressão. Na fase seguinte já ocorre uma variação significativa das dimensões da peça devido a evaporação da água coloidal, que aproxima os grãos presentes na microestrutura. Há formação de vazios no interior da peça devido a formação de uma camada

fina de água que se deslocou por capilaridade ou difusão, para a parte mais superior do material. Na terceira fase a amostra muda de cor. Essa mudança ocorre devido ao desvanecimento da fina camada de água formada na segunda fase. Como consequência disto, formam-se vazios no interior da peça e cada vez menos água evapora, diminuindo assim a velocidade de evaporação. Na última fase, que também pode ocorrer na etapa de sinterização, a água evapora toda ou parcialmente, diminuindo gradativamente a velocidade de secagem até valores perto de zero.

### *Sinterização*

Na sinterização o material sofrerá um tratamento térmico em uma temperatura menor que sua temperatura de fusão, alterando assim sua estrutura microscópica. Essa mudança ocorre como resultado dos dois possíveis métodos de transportes, que são denominados de consecutivos ou concorrentes, cuja finalidade é obter uma peça sólida coerente. Durante o processo, ocorrem reações no estado sólido do elemento que são ativadas termicamente. Algumas reações podem ocorrer espontaneamente quando a base atinge uma temperatura determinada (EXNER, 1979).

Existem, principalmente, dois tipos de sinterização: a sinterização por fase sólida e a sinterização por fase líquida. Estes dois tipos são capazes de densificar total ou parcialmente a estrutura, sendo que com o primeiro tipo é possível se obter uma estrutura com porosidade controlada, enquanto que o fechamento total da porosidade é mais facilmente obtido através da sinterização por fase líquida (SILVA; JUNIOR, 1998).

Na sinterização por fase sólida, o transporte do material é realizado sem que haja qualquer líquido na estrutura interna do material. O tipo de transporte de material pode ser por fluxo viscoso, por difusão atômica ou por transporte de vapor. Seja qual for o tipo de transporte atuante, rigidez e densificação são conseguidas pelo aumento da área de contato entre as partículas e o melhor empacotamento de matéria (SILVA; JUNIOR, 1998).

Diferente da sinterização por fase sólida, a sinterização por fase líquida ocorre com a presença de líquido na estrutura do material, aspecto importante na estrutura sinterizada, decorrente da fusão de um dos componentes presentes no sistema ou formado pela reação entre, pelo menos, de dois componentes que o formam. Esse tipo de sinterização é empregado em materiais que não são sinterizados pelo primeiro método e na obtenção de materiais compósitos (SILVA; JUNIOR, 1998).

Dentre os trabalhos de sinterização de adoquins podem-se citar os realizados por:

- i) Candido (2012), realizou a queima do adoquim em forno EDG 3P-S a 850°C, utilizando uma taxa de aquecimento de 2°C/min e os corpos de prova foram mantidos

na temperatura patamar por 30 min e resfriados por convecção natural desligando-se o forno;

ii) Carvalho (2015) utilizou um forno industrial intermitente do tipo abóboda com temperatura de 830°C, comumente utilizada em indústrias.

iii) Pinheiro (2012) fez um estudo sobre a sinterização de peças em uma única camada utilizando a parte superior do forno, com temperatura de queima controlada em torno de 950°C.

### **3.4 Técnicas de Caracterização**

A caracterização dos materiais é uma etapa essencial para o estudo de reaproveitamento de rejeitos, pois ela fornece as características mineralógicas e de texturas necessárias para sua reutilização. A caracterização mineralógica tem como objetivos a determinação de todas as fases presentes e a quantificação dos elementos úteis presentes neste tipo de material (NEUMANN, *et al*, 2004). A técnica de caracterização pode ser dividida, de uma forma simplificada, nas seguintes etapas: amostragem, análise granulométrica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia óptica (MO), difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX).

#### **3.4.1 Amostragens**

O processo de amostragem consiste na remoção de certas quantidades de material de uma amostra global, a fim de representá-la corretamente, ou seja, amostragem é um processo de seleção e inferência que, a partir do conhecimento de uma parte, se planeja tirar conclusões precisas de um todo (GOES, *et al*, 2010).

Os tipos mais comuns de amostragens são as amostragens aleatórias e as amostragens sistemáticas. A amostragem aleatória é utilizada quando a informação sobre o material a ser amostrado é insuficiente ou inexistente. Nela as amostras são escolhidas de maneira aleatória fazendo com que todas as partes do material sejam englobadas. Na amostragem sistemática, as amostras são coletadas em intervalos já definidos. Este tipo de amostragem é mais confiável quando já se tem uma informação prévia sobre o material (GOES, *et al*, 2010).

### 3.4.2 Análises granulométrica

Um pré-requisito importante para a maioria dos processos de caracterização é o conhecimento e o entendimento do diâmetro médio das partículas. O diâmetro médio das partículas interfere significativamente na resistência mecânica e na densidade. Quando o tamanho e a distribuição das partículas não estão adequadamente controlados, podem ocorrer perdas de produção significativas (PRICE, 2009).

Existem vários métodos e vários equipamentos utilizados para realizar análise granulométrica, cada método mais eficiente para um tipo de material ou um diâmetro médio específico. Dentre eles pode-se citar o peneiramento, *cyclosizer* e o granulômetro à laser (Cilas).

Peneiramento nada mais é do que a separação de um material em duas ou mais classes. É um método de análise granulométrica, onde as faixas de tamanho das partículas são obtidas através de uma série de peneiras, que contêm o número de malhas e conseqüentemente o diâmetro das aberturas diferentes. Existem várias séries de peneiras, as mais usuais são a Tyler, a Richards e a ISO (CARRISSO; CORREIA, 2004).

O *cyclosizer* é constituído por um conjunto de hidrociclones em série. A geometria de cada hidrociclone favorece a classificação devido aos diâmetros decrescentes na alimentação do equipamento e na saída do mesmo na direção do fluxo. A redução dos diâmetros resulta em altas velocidades de suspensão e forças centrífugas com maior intensidade no interior dos hidrociclones, causando uma redução do tamanho limite de separação das partículas (WILLS, 1988). Este método de distribuição granulométrica é ideal para partículas com diâmetro médio entre 10 e 50 micrometros. Esse equipamento é muito empregado na classificação granulométrica, nas áreas de processamento de minérios finos, fabricação de massas cerâmicas, pigmentos, abrasivos e fertilizantes, metalurgia do pó, dentre outras. Uma das vantagens deste método é o fato dele ser simples e rápido, um ensaio dura em torno de 10 a 15 minutos (WILLS, 1979).

A medição da distribuição de tamanho das partículas por granulometria a laser é realizada a partir da variação do ângulo da intensidade da luz dispersada quando um feixe de laser passa através de uma amostra de partículas. As grandes partículas tendem a dispersar a luz em pequenos ângulos, já as pequenas partículas dispersam a luz em grandes ângulos. A análise dos dados de intensidade de espalhamento angular é importante para o cálculo dos tamanhos das partículas, pois eles são responsáveis por criar o padrão de dispersão. Geralmente

esse equipamento é utilizado para a análise granulométrica de partículas mais finas, ou seja, partículas com o diâmetro menor que 500 micrometros (MALVERN, 2012).

### **3.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento utilizado para análise de microestruturas de materiais sólidos. A sua grande vantagem em relação ao microscópio óptico é sua alta resolução, na ordem de 2 a 5 nanometros (20 a 50 Ângstroms) (STEFANAKI, 2008). Uma distinção essencial entre os dois microscópios é o tipo de luz branca emitida, no MEV se utiliza um feixe de elétrons ao invés de fótons, o que potencializa a resolução óptica. O desempenho do MEV é baseado na interação de um feixe de elétrons finamente colimado com a amostra. O MEV propicia imagens na cor cinza devido a algum sinal gerado da interação do feixe com a superfície da amostra. Estas imagens são constantemente utilizadas em topografia e principalmente na tecnologia mineral, onde sua maior aplicabilidade é verificar a morfologia de minerais, podendo atingir resoluções elevadas na ordem de poucos nanômetros (NEUMANN, *et al*, 2004).

### **3.4.4 Microscópio Óptico (MO)**

Uma das formas mais antigas de visualização do invisível ao olho é o microscópio óptico, que ilumina o objeto com luz visível ou luz ultravioleta. O limite máximo de resolução dos microscópios ópticos é estabelecido pelos efeitos de difração devido ao comprimento de onda da radiação incidente. Os microscópios ópticos convencionais ficam, então, limitados a um aumento máximo de 2000 vezes, porque acima deste valor, detalhes menores são imperceptíveis. Para aumentar a resolução pode-se utilizar uma radiação com comprimento de onda menor que a luz visível como fonte de iluminação do objeto. Além disso, a profundidade de campo é inversamente proporcional aos aumentos, sendo necessário, então, um polimento perfeito da superfície a ser observada. (KESRENBACHK, 1994).

### **3.4.5 Difração de raios X (DRX)**

A primeira lei da difração de raios X foi desenvolvida por Bragg, sendo que a equação dessa lei é  $n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$  (onde  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente,

“ $n$ ” ao número inteiro relacionado com comprimentos de onda (ordem de difração), “ $d$ ” à distância interplanar e “ $\theta$ ” corresponde ao ângulo de incidência dos raios X). A lei deduz que o feixe incidente normal ao plano de difração produz um feixe difratado que é sempre coplanar e que o ângulo entre o feixe difratado e o transmitido é sempre duas vezes o ângulo incidente normal à superfície (CULLITY; STOCK, 2001). Os raios dispersos por todos os átomos dos planos estão em fase e eles sofrem interferência construtiva para formar um feixe difratado em certa direção. Em todas as outras direções, fora do plano, os feixes dispersos não estarão em fase, e eles se anularão um ao outro, ou seja, irão sofrer interferência destrutiva (CULLITY; STOCK, 2001).

O método DRX identifica os minerais que compõem a amostra a partir da determinação das distâncias interplanares ou da posição angular das células cristalinas, que são compostas por planos diretamente relacionados com o raio atômico e os tipos de ligação de cada um dos átomos. No difratograma, onde são mostrados os resultados, os reflexos estão relacionados com a posição, intensidade e forma da estrutura cristalina, permitindo assim a caracterização da composição mineralógica dos minerais (JENKINS, 1989). A identificação das fases constituintes da amostra se dá pela comparação do difratograma gerado com um difratograma padrão coletado e mantido por um banco de dados cristalográficos, o ICDD (International Center for Diffraction Data). Esse método também dá a oportunidade de determinar os parâmetros de rede, avaliar o grau de cristalinidade e quantificar as fases presentes na amostra (JENKINS, 1989).

#### ***3.4.6 Fluorescência de raios X (FRX)***

A fluorescência de raios X é uma técnica que analisa qualitativamente e quantitativamente os elementos químicos presentes no material, mas somente é identificado os elementos químicos com um número atômico maior que 11 ( $Z > 11$ ). Esse método determina as concentrações dos elementos a partir das intensidades dos raios X (JENKINS, 1989).

O princípio da fluorescência de raios X consiste na utilização de uma fonte de radiação X que ioniza os níveis internos dos átomos que fazem parte da amostra. No regresso dos átomos ao seu estado fundamental, eles liberam a energia excedente através da emissão de um fóton X de energia similar à diferença de energia de ligação dos níveis entre os quais se deu a transição. Cada elemento tem sua radiação específica emitida. Através da análise do espectro, os elementos constituintes da amostra são identificados e quantificados (JENKINS, 1989).

## **3.5 Ensaaios Mecânicos**

### ***3.5.1 Ensaio de compressão***

O ensaio visa determinar o comportamento de materiais sob cargas de esmagamento. O material é comprimido e a deformação em várias cargas é registrada. A tensão de compressão e deformação são calculadas e representadas como um diagrama de tensão-deformação que será então utilizado para determinar o limite elástico, limite proporcional, ponto de cedência, resistência à deformação e resistência à compressão. As normas utilizadas no ensaio de compressão são: ASTM C-773 (cerâmica de alta resistência), ASTM E-9 (metais), ASTM E-209 (metais a temperaturas elevadas) e ASTM D-695 (plásticos) (INSTRON, 2016).

### ***3.5.2 Ensaio de flexão***

Materiais cerâmicos possuem natureza frágil, isto é, absorvem a energia que está sendo aplicada sobre eles até se deformar até um ponto crítico no qual fraturam sem aviso prévio (falha catastrófica). Assim, são caracterizadas mais formalmente como materiais de baixa tenacidade, que praticamente não possuem regime plástico de deformação (BEREZOWSKI, *et al*, 2002).

Para caracterização quanto às características descritas acima utiliza-se o ensaio de flexão, que pode se classificar como em três ou quatro pontos. Nele, os corpos de prova podem assumir seção transversal circular, quadrada ou retangular. É um procedimento de baixo custo e de execução rápida, porém possui o inconveniente de apresentar grandes variações no nível de resistência medida em função das dimensões dos corpos de prova e do modo de aplicação da carga. (BEREZOWSKI, *et al*, 2002).

Os principais resultados obtidos no ensaio de flexão são: módulo de ruptura na flexão, módulo de elasticidade, módulo de resiliência e módulo de tenacidade.

### ***3.5.3 Retração linear de queima***

A retração linear é a redução do tamanho sofrida por uma peça cerâmica após a secagem seguida da queima. Esta retração refere-se à eliminação da água que foi utilizada para a conformação da peça (SANTOS, 2013).



Na etapa de queima, como consequência da fusão parcial dos elementos menos refratários que compõem a massa cerâmica, inicia-se um processo de formação de fases líquidas no interior do corpo cerâmico. Além desse processo, o aumento da temperatura também provoca a diminuição da viscosidade das fases líquidas, facilitando assim a fluidez para dentro dos espaços vazios, entre as partículas que ainda não se fundiram. As fases líquidas causam a aproximação das partículas sólidas durante o preenchimento dos espaços vazios, através de forças de capilaridade. O resultado dessa aproximação é a diminuição do volume dos poros e retração da peça (MELCHIADES, *et al.*, 2001).

Para manter a estabilidade dimensional de uma massa cerâmica é preciso obter a retração linear de queima o mais baixo e mais constante possível ao longo do processo de produção da peça. Deve-se então evitar variações de composição das matérias primas que fazem parte da massa e objetivar a formulação de massas que apresentem baixa sensibilidade às variações naturais do processo de fabricação (MELCHIADES, *et al.*, 2001).

#### **3.5.4 Absorção de água**

Absorção de água pode ser definido como o processo pelo qual um líquido é transportado para o interior dos poros de um corpo sólido (ABNT/NBR 30:2001). Entretanto, o ganho de peso por absorção de água não está relacionado com a porosidade do corpo, mas sim, ainda que de uma maneira não linear, com a temperatura de queima e composição do corpo sólido (MENEZES, *et al.*, 2003).

A quantidade total de água exigida para trazer um agregado da condição seca para a condição saturada com a superfície seca, é definida como a capacidade de absorção de água de um corpo sólido. Conforme o teor de umidade e a composição dos grãos do agregado há um aumento expressivo do volume aparente, isso se deve ao fato da tensão superficial da água manter as partículas do agregado afastadas. Quando há uma quantidade excessiva daquela requerida para a condição saturada com a superfície seca, essa condição é denominada umidade superficial (EFFTING, 2014).

Produtos de cerâmica vermelha possuem valores característicos de absorção de água. Um tijolo maciço e blocos cerâmicos devem ter no máximo 25% de absorção de água. Já produtos mais rústicos, como telhas, devem ter no máximo 18% de absorção. (VIEIRA, *et al.*, 2000)

### ***3.5.5 Índice de abrasão***

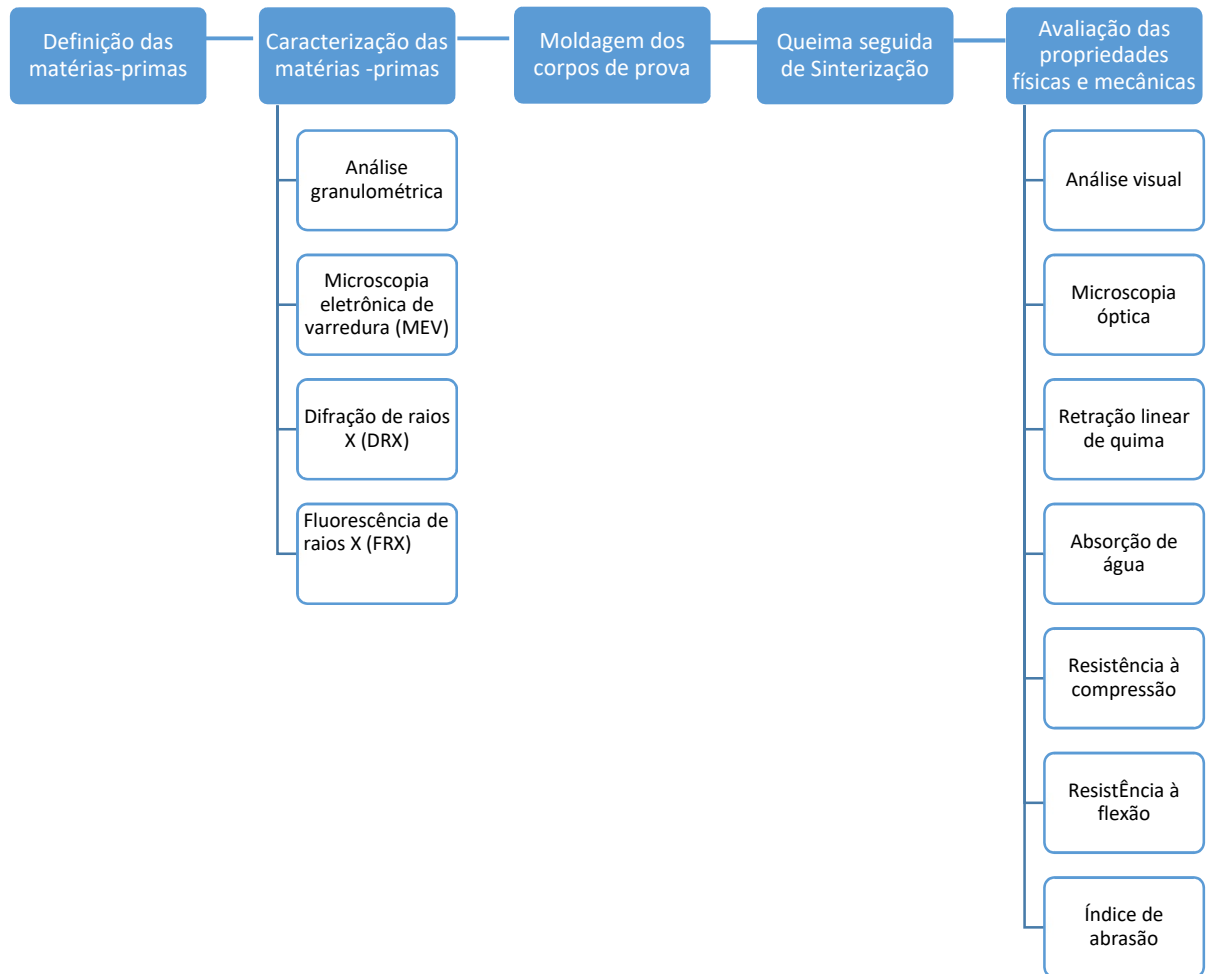
Abrasão é definido como o desgaste causado na superfície pelo movimento de pessoas ou objetos (Abrasão...,2016). Um material submetido a alta abrasão pode sofrer um desgaste na sua superfície devido o contato com superfícies de alta abrasividade (arestas agudas e cortantes) e elevados níveis de atrito (Resistência à abrasão, 2016).

A resistência à abrasão pode ser analisada através do cálculo de índice de abrasão (IA), uma relação entre absorção de água e resistência à compressão (CARVALHO, 2015). Quanto maior for o valor da resistência à compressão, menor o valor do índice de abrasão, ou seja, menor será o desgaste causado na superfície por ela apresentar uma maior resistência.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A figura 5 ilustra todas as etapas que foram realizadas no trabalho, desde a escolha das matérias-primas à caracterização dos corpos de prova.

**Figura 5 - Fluxograma dos materiais e métodos utilizados no trabalho.**



Fonte: Própria autora.

### 4.1 Amostras

Neste trabalho foram usadas amostras de rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem do Fundão (Bento Rodrigues, distrito de Mariana – MG). Também foram utilizadas amostras duas argilas comerciais denominadas de Cinza e Terracota.

## 4.2 Amostragem

As amostras de rejeito foram coletadas à margem do Rio do Carmo. O ponto de coleta quanto o mapa do local é ilustrado nas figuras 6 e 7.

Após a coleta, as amostras foram secas em estufa a 100°C por 24 horas. Depois de secas elas foram desagregadas, homogeneizadas e quarteadas em alíquotas de 200 g para sequência do trabalho.

**Figura 6 - Trecho do Rio do Carmo onde foi coletada a amostra.**



Fonte: Própria autora.

**Figura 7 - Mapa do local da coleta da amostra do rejeito.**



Fonte: <https://www.google.com.br/maps>.

### **4.3 Caracterizações das Amostras**

#### **4.3.1 Análise granulométrica**

As análises granulométricas foram realizadas no laboratório de Práticas Cerâmicas do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET-MG. Primeiramente uma alíquota de 200 g foi peneirada a seco utilizando peneiras de 2,38 mm; 2 mm; 1,16 mm; 0,6 mm; 0,425 mm e 0,075 com auxílio de um peneirador mecânico, seguindo a NBR 7181 (ABNT, 1984). Posteriormente as massas passantes na peneira de 0,075 mm foram submetidas a uma nova análise granulométrica utilizando o analisador de partículas a laser (CILAS modelo 1090). As análises de granulometria a laser foram realizadas no Laboratório de Cerâmicas Finas do DEMAT (CEFET-MG) utilizando a teoria de Fraunhofer. O equipamento apresenta faixa analítica de 0,04 a 500  $\mu\text{m}$ , 64 detectores, 100 classificações de tamanho de partículas e 2 emissores de laser para cobrir uma grande faixa analítica.

#### ***4.3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)***

As análises no MEV foram realizadas no Laboratório de Caracterização do DEMAT (CEFET-MG) 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 2400X.

#### ***4.3.3 Difração de raios X (DRX)***

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

#### ***4.3.4 Fluorescência de raios X (FRX)***

As análises de FRX foram realizadas no Laboratório de Caracterização do DEMAT (CEFET-MG) utilizando o equipamento Shimadzu EDX-720. As análises foram realizadas em pastilhas prensadas e sob vácuo e em termos de óxidos.

### **4.4 Preparações das Formulações dos Adoquins**

Esta etapa consistiu na formulação de sete massas com utilização do rejeito em substituição parcial e total à argila (matéria-prima dos adoquins). Foram confeccionados 9 corpos de prova de cada massa com objetivo de comparar os resultados encontrados. As formulações definidas são mostradas na Tabela 6.

**Tabela 6 - Formulações utilizadas para a preparação das amostras.**

Massa	Argila	Rejeito
M1	100%	0%
M2	95 %	5%
M3	90%	10%
M4	75%	25%
M5	50%	50%
M6	25%	75%
M7	0	100%

Fonte: Própria autora.

#### ***4.4.1 Processamento dos adoquins***

O processo de conformação dos adoquins foi realizado no Laboratório de Cerâmicas Finas do DEMAT (CEFET-MG) com o auxílio de uma prensa hidráulica SL12 MARCA SOLAB, com controle manual e um molde de aço (Figura 8). As dimensões dos corpos de prova é de aproximadamente 60,0 x 20,5 x 11,0mm (adaptado de CARVALHO, 2015). A carga utilizada foi de aproximadamente 9 Toneladas e a velocidade de prensagem foi controlada manualmente. Após a prensagem, os corpos de prova foram mensurados e secos, em estufa, a 110°C por 24 horas.

**Figura 8 - Molde utilizado para confecção dos corpos de prova.**

Fonte: Própria autora.

Foram também preparados corpos de prova para realização do ensaio de compressão utilizando um molde cilíndrico. A carga utilizada também foi de aproximadamente 9 Toneladas e a velocidade de prensagem também foi controlada manualmente. Após a prensagem, os corpos de prova foram mensurados e secos, em estufa, a 110°C por 24 horas. Os diâmetros dos corpos de prova são de aproximadamente 50mm.

#### **4.5 Sinterização**

A sinterização foi realizada no Laboratório de Cerâmicas Finas do DEMAT (CEFET-MG) utilizando o forno elétrico com rampas de aquecimento e temperatura máxima de queima de 1700 °C. Foram utilizadas duas temperaturas de queima: 900°C e 1100°C. Após a sinterização foi realizada uma análise visual para identificar possíveis defeitos superficiais nos corpos de prova.

#### **4.6 Determinações das Propriedades Físicas e Mecânicas**

Após a sinterização os corpos de prova foram submetidos à determinação das propriedades físicas e mecânicas. Foi avaliada a retração linear, absorção de água, resistência à compressão uniaxial, resistência a flexão e índice de abrasão. Além disso, também foram feitas imagens em microscópio óptico para verificar a morfologia da superfície dos corpos de prova pós queima.

##### ***4.6.1 Microscópio Óptico***

A análise morfológica foi realizada no Laboratório de Metalografia do DEMAT (CEFET-MG). O microscópio óptico utilizado foi o KONTROL modelo MI713 e foram utilizadas ampliações de 100x e 200x.



#### 4.6.2 Retração linear (*Rq*)

Para a determinação da retração os corpos de prova tiveram suas dimensões medidas antes e após a queima, utilizando-se um paquímetro digital (resolução  $\pm 0,01\text{mm}$ ). Para o cálculo da retração foi utilizada a Equação 1 (CARVALHO, 2015).

$$Rq = \frac{Ls - Lq}{Lq} \times 100 \quad (1)$$

Sendo:

$Rq$  = Variação da retração linear após a queima, em porcentagem;

$Ls$  = Comprimento do corpo de prova antes da queima, em milímetros;

$Lq$  = Comprimento do corpo de prova após a queima, em milímetros;

#### 4.6.3 Absorção de água (*AA*)

Este ensaio foi executado de acordo com a norma ASTM C373-72. Os corpos de prova foram pesados utilizando uma balança analítica de precisão, submersos em água fervendo por 2 horas e resfriados em temperatura ambiente por 4 horas. Posteriormente retirou-se a água superficial de cada peça com o auxílio de papel toalha e as massas foram novamente registradas. O índice de absorção de água foi calculado de acordo com a Equação (2).

$$AA (\%) = \frac{P_u - P}{P_s} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

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

$P_u$  = Peso da peça saturada em água; úmida (g);

$P_s$  = Peso da peça seca (g);

#### 4.6.4 Resistência à compressão (*RC*)

O ensaio de resistência à compressão longitudinal simples foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia de Transportes (CEFET-MG), utilizando-se a máquina universal para ensaios, modelo EMIC GR048, com capacidade máxima

de 300kN. Foram utilizados no ensaio corpos de prova cilíndricos de cada composição. Em seguida, o RC será calculado utilizando-se a Equação 3 (CANDIDO, 2012):

$$RC = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Sendo:

RC = Resistência à compressão uniaxial (MPa);

P = Carga de ruptura (kN);

A = Área da secção transversal (mm<sup>2</sup>);

#### 4.6.5 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão foi realizado no Laboratório de Polímeros do DEMAT (CEFET-MG) utilizando-se a máquina universal para ensaios AG-X, da Shimadzu. A tensão de flexão final foi a média da tensão de flexão dos corpos de prova de cada condição. A tensão de flexão é dada por:

$$\sigma_{flexão} = \frac{Mf \times C}{ICG} \quad (4)$$

Onde:

C = metade do valor da espessura, em milímetros;

Mf = momento fletor;

ICG = é o momento de inércia em relação ao centro de gravidade

A fórmula matemática para calcular o momento fletor é dada por:

$$Mf = \frac{FxL}{4} \quad (5)$$

Onde:

F = força atingida no ensaio, em Newton (N);

L = distância entre os apoios, em milímetros (mm);

Para calcular o momento de inércia com relação ao centro de gravidade, utiliza-se a equação:

$$ICG = \frac{b \times h^3}{12} \quad (6)$$

Onde:

b = espessura do corpo de prova em milímetros (mm);

h = altura do corpo de prova em milímetros (mm);

Após o cálculo do momento fletor e do momento de inércia utilizando as equações 5 e 6, respectivamente, pode-se assim obter a tensão de flexão, utilizando a equação 4.

#### **4.6.6 Índice de abrasão**

O índice de abrasão (IA) foi avaliado de acordo a norma colombiana NTC 3829/2004 que utiliza a Equação 8 para determinar o valor do IA (CARVALHO, 2015). Essa norma classifica o adoquim de acordo com o tipo de tráfego de pedestres como de alta (Tipo I), média (Tipo II) e baixa abrasão (Tipo III), os índices de abrasão correspondentes são de 0,11, 0,25 e 0,50, respectivamente.

$$IA = \frac{0,69 \times AA}{RC} \quad (7)$$

Onde:

AA = absorção de água em valor absoluto (%);

RC = resistência à compressão (MPa).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização química e Mineralógica das Matérias-Primas

#### 5.1.1 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica em peneiras mostrou que a última peneira utilizada (74  $\mu\text{m}$ ) não reteve uma quantidade significativa de material. Este resultado já era esperado, pois as granulometrias deste rejeito e das argilas são muito finas, como mostram os estudos realizados por Santos (2012). Portanto, para avaliar a granulometria foram utilizados os resultados obtidos no granulômetro a laser CILAS, mostrados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Tabela com a distribuição de tamanho das partículas das matérias-primas.**

Material	Diâmetro a 10% ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro a 50% ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro a 90% ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )
Argila Cinza	2,16	9,79	39,48	15,71
Argila Terracota	2,18	9,86	49,57	18,26
Rejeito	2,53	23,56	98,74	39,29

Fonte: Próprio Autor.

Observa-se que os diâmetros médios das partículas das argilas comerciais Cinza e Terracota não variam muito, 15,71  $\mu\text{m}$  para a Cinza e 18,28  $\mu\text{m}$  para a Terracota. O diâmetro médio das partículas de rejeito (39,29  $\mu\text{m}$ ) também está dentro de um valor esperado, pois sabe-se que este rejeito estudado possuiu granulometria fina, que é gerada de acordo com o processamento mineral, neste caso flotação, e o processo de deslamagem (LIMA, 2006; FIGUEIREDO, 2007).

Pode-se observar também que existe uma variação granulometria para os diâmetros a 10%, 50% e 90% e que os diâmetros médios das partículas de todas as amostras não ultrapassaram 40 $\mu\text{m}$ . Portanto, pode-se afirmar que todas as amostras estão dentro de um padrão aceitável (não necessitando de moagem) para confecção dos corpos de prova. Vale ressaltar que, a distribuição granulométrica e o tamanho das partículas influenciam diretamente no empacotamento das mesmas, e conseqüentemente, no volume de poros dos produtos (AIQUIN, *et al*, 1999).

### 5.1.2 Fluorescência de raios X (FRX)

Observa-se na Tabela 8 que as duas argilas (Cinza e Terracota) possuem como óxidos predominantes o  $\text{SiO}_2$  (45,1% para a argila Cinza e 49,8% para a argila Terracota) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (43,4% para a argila Cinza e 28,3% para a argila Terracota). Na maioria das vezes, esses estão associados à estrutura da caulinita e do quartzo. Estes resultados juntamente com os resultados de granulometria (Tabela 7) são adequados para o processamento de materiais cerâmicos, pois de acordo com Netto (2006), materiais com granulometria fina e que contêm argilosos apresentam bom potencial para serem reaproveitados em massas cerâmicas.

O teor de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) é responsável pela coloração avermelhada após a queima das massas cerâmicas, quanto maior o teor de ferro mais avermelhado será o produto final (SANTIS, 2012). Pode-se observar que a argila Cinza apresentou 3,7% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e argila Terracota 14,6% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Portanto, como foi observado na análise visual, os corpos de prova confeccionados com a argila Terracota apresentaram uma coloração mais avermelhada.

**Tabela 8 - Resultado do FRX das matérias-primas do adoquim**

Componente	Argila Cinza	Terracota	Rejeito
$\text{SiO}_2$	45,1%	49,8%	35,5%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	43,4%	28,3%	5,2%
$\text{TiO}_2$	4,3%	2,3%	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,7%	14,6%	58,6%
$\text{K}_2\text{O}$	2,8%	4,1%	0,4%
$\text{MnO}$	0,1%	0,1%	0,2%
$\text{MgO}$	-	0,4%	-
Outros	0,6%	0,4%	0,1%

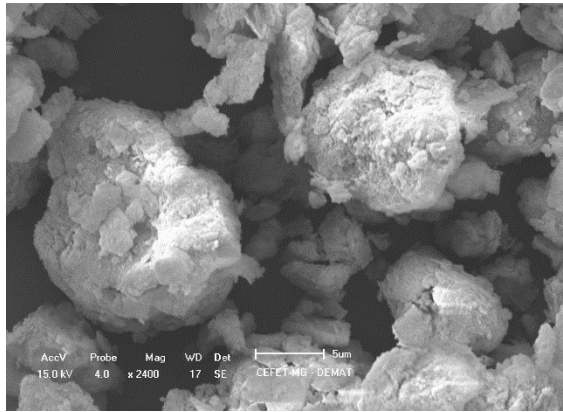
Fonte: Própria autora.

### 5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

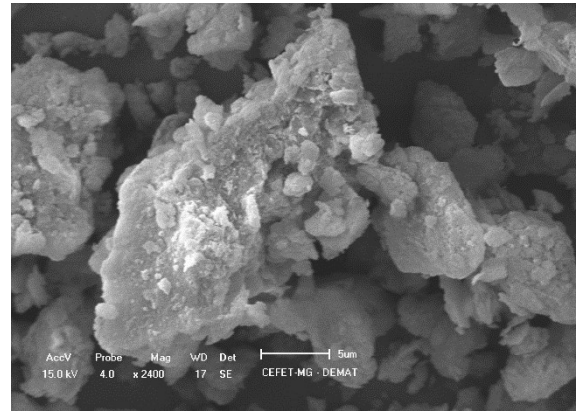
A Figura 9 mostra as microestruturas das amostras obtidas pelo MEV. Pode-se observar que as microestruturas das partículas são bastante semelhantes, pois as mesmas são

arredondadas. A presença de aglomerados já era esperada pelo fato dessas amostras possuírem partículas muito finas e uma distribuição heterogênea, como mostrou a análise granulométrica.

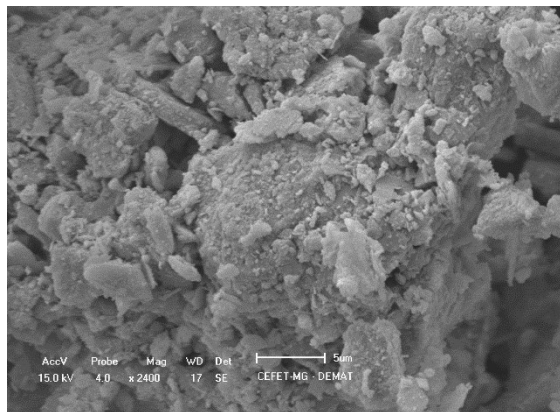
**Figura 9 - MEV das matérias-primas.**



(a)



(b)



(c)

(a) Argila Cinza, (b) Argila Terracota, (c) Rejeito.

Fonte: Própria autora.

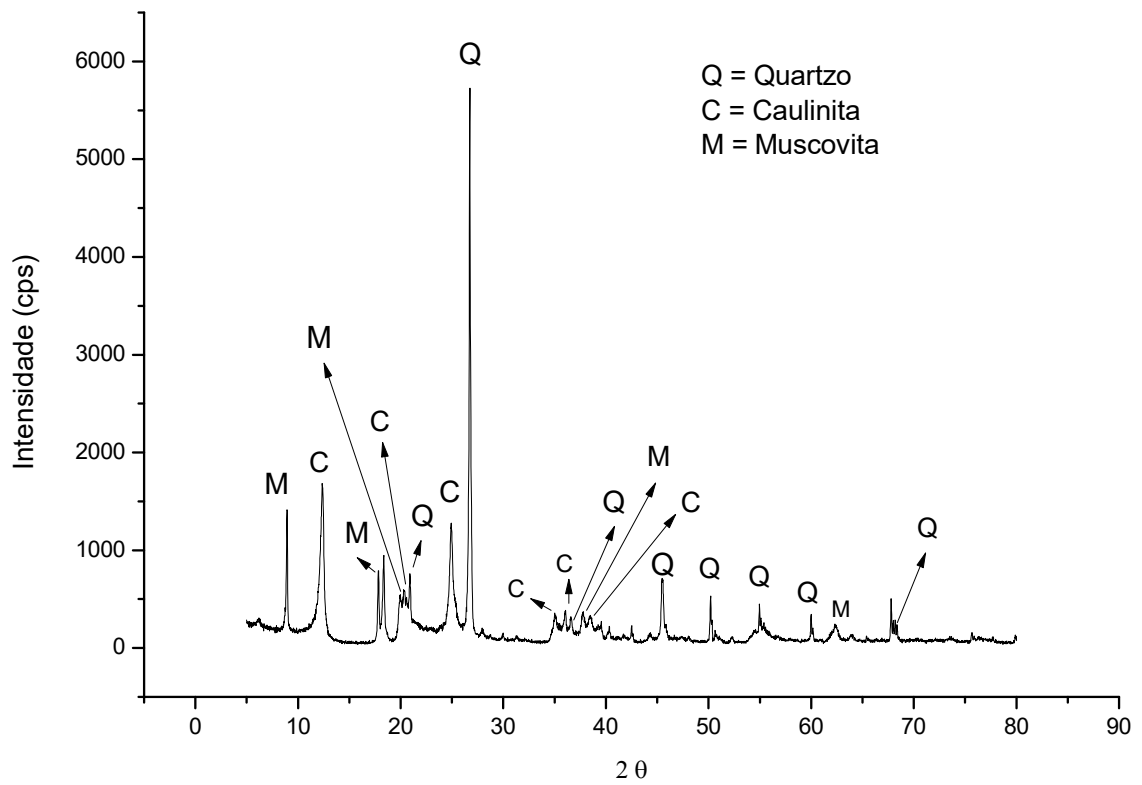
É possível observar a predominância de partículas de morfologia irregular associadas, provavelmente, aos argilominerais e aos minerais de ferro presentes nas amostras.

#### **5.1.4 Difração de raios X – DRX**

De acordo com as Figuras 10 e 11 pode-se observar que as argilas são compostas basicamente por quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e muscovita ( $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). A diferença entre elas está na presença da fase magnetita na argila Terracota, este resultado corrobora a FRX, uma vez que essa argila apresentou maior teor de

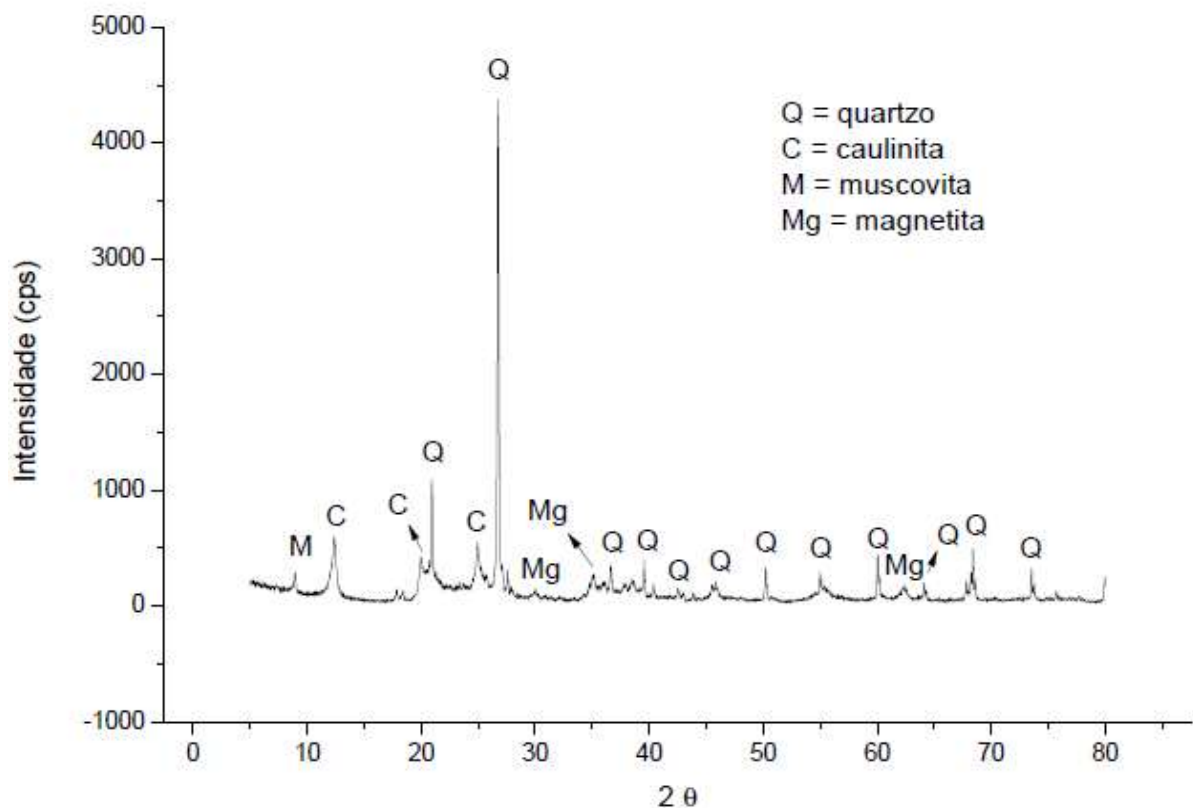
$\text{Fe}_2\text{O}_3$  (14,6%). Este resultado está de acordo com os estudos realizados por Vieira, *et al*, (2004) e por Abel (2009), que também constataram a presença de caulinita, quartzo e muscovita nas argilas.

**Figura 10 - DRX da argila Cinza.**



Fonte: Própria autora.

**Figura 11 - DRX da argila Terracota.**



Fonte: Própria autora.

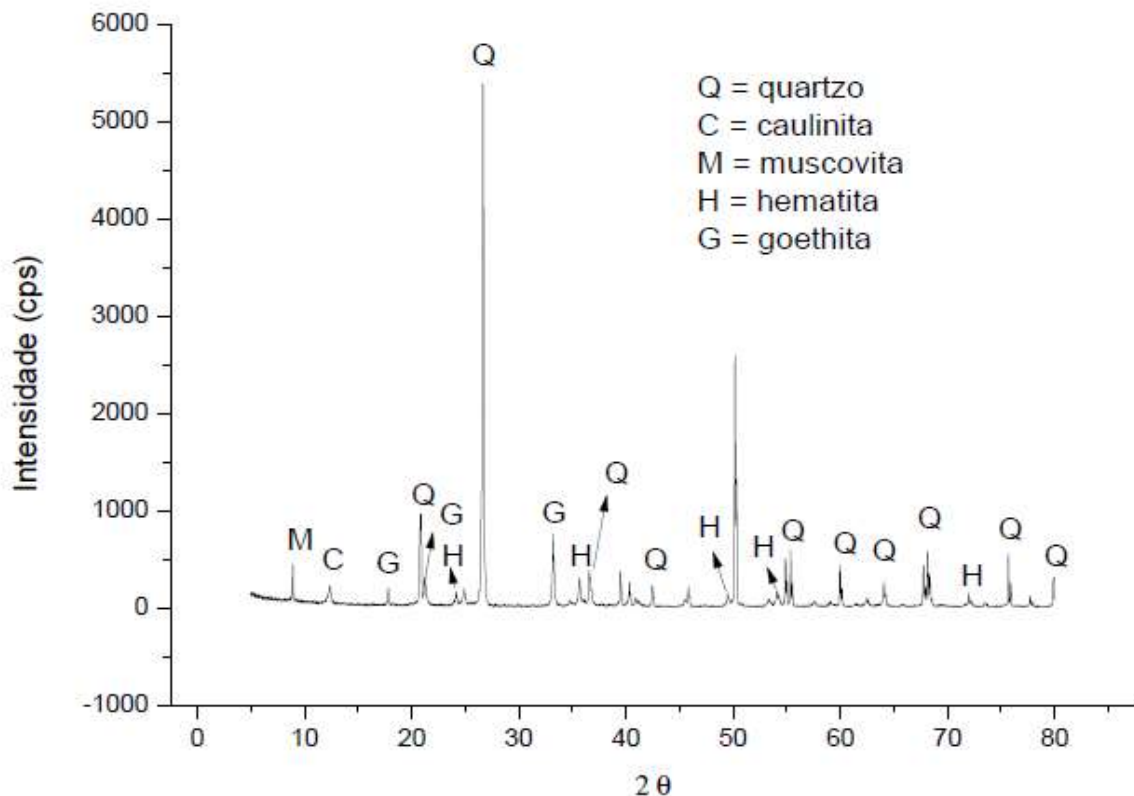
O quartzo pode ser considerado a principal impureza contida na argila, pois durante a sinterização atua como matéria-prima não plástica e inerte (CANDIDO, 2012), prejudicando a conformação. Mas quando se deseja formar fase vítrea nos materiais cerâmicos, ele é o principal formador (SANTIS, 2012).

A caulinita é responsável pela plasticidade da argila quando a mesma é misturada com água (SOUZA, 2007). A presença de muscovita pode acarretar defeitos na peça cerâmica após sinterização. Isto se deve ao fato da muscovita ser um mineral com textura lamelar, mas desde que apresente um tamanho de partícula pequeno, pode atuar como fundente devido à sua composição rica em óxidos alcalinos e possuir característica expansiva (RIBEIRO, 2010).

Na Figura 12 é mostrado o DRX do rejeito. Observa-se que ele é composto pelas fases hematita e goethita, quartzo, caulinita e muscovita. Este resultado está coerente com a análise química por FRX, que mostrou que a amostra de rejeito é composta basicamente por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Além disso, estes resultados estão de acordo com os estudos realizados por Wolff (2009), por Mendes *et al*, (2013) e por Andrade (2014).



**Figura 12 - DRX do rejeito.**



Fonte: Própria autora.

De acordo com Santos (2003), a caracterização pelo DRX de amostras provenientes da barragem de Germano, próximo a barragem do Fundão, em Bento Rodrigues, mostrou que as fases encontradas são semelhantes as fases encontradas nesse estudo, correspondentes a magnetita, hematita, goethita, caulinita, gibbsita, muscovita e quartzo.

A presença da goethita pode ser explicada pelo fato de que ambientes com drenagem deficiente, como pode ser o caso de uma barragem de rejeito, favorecem a hidratação da hematita, transformando-a em goethita, como observado por Barbosa et al. (2009) e Motta et al. (2002).

## 5.2 Análise visual

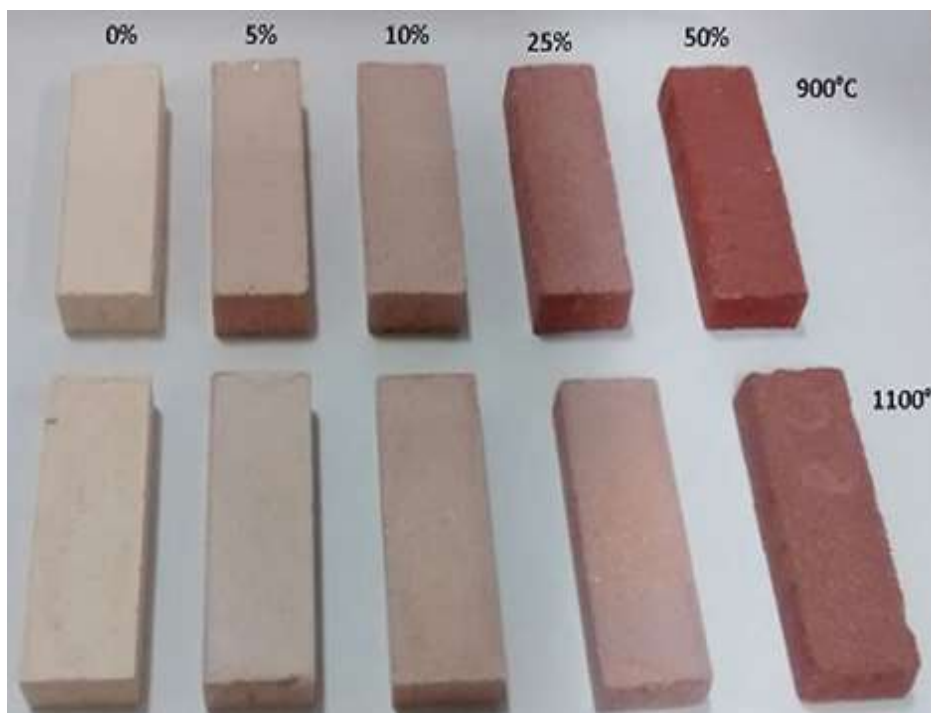
A análise visual (Figuras 13 e 14) mostrou que os corpos de provas contendo 0%, 5%, 10%, 25% e 50% de rejeito apresentaram um aspecto homogêneo, arestas regulares, com poucas rebarbas e livre de defeitos, como por exemplo, trincas visíveis. Entretanto, para uma melhor adequação dos testes mecânicos, os mesmos foram lixados em lixa de #80 para eliminar

qualquer rebarba ou aresta livre existente, obtendo assim uma homogeneidade bem regular da superfície.

Os corpos de provas contendo 75% e 100% (Figura 15) sofreram fratura prévia após sinterização. Sendo assim, os corpos de prova com as formulações citadas foram descartados. Essa fratura prévia pode ser explicada pelo fato da interação entre as partículas dos materiais não plásticos serem fracas e também pode ser ocasionada na etapa de prensagem do material (CANDIDO, 2012).

Por fim, pode-se observar que os corpos de prova confeccionados com a argila Terracota apresentaram uma coloração mais avermelhada, provavelmente, devido a presença de minerais de ferro nessa argila.

**Figura 13 - Corpos de prova de argila Cinza com as proporções de rejeito indicadas na figura, após sinterização.**



Escala 1:1.

Fonte: Própria autora.

**Figura 14 - Corpos de prova de argila Terracota com rejeito com as proporções indicada na figura, após sinterização.**



Escala 1:1.

Fonte: Própria autora.

**Figura 15 - Corpos de prova que sofreram fratura prévia após a sinterização, com composição de 75% e 100% de rejeito, respectivamente.**



Fonte: Própria autora.

### 5.3 Caracterização Física dos Corpos de Prova

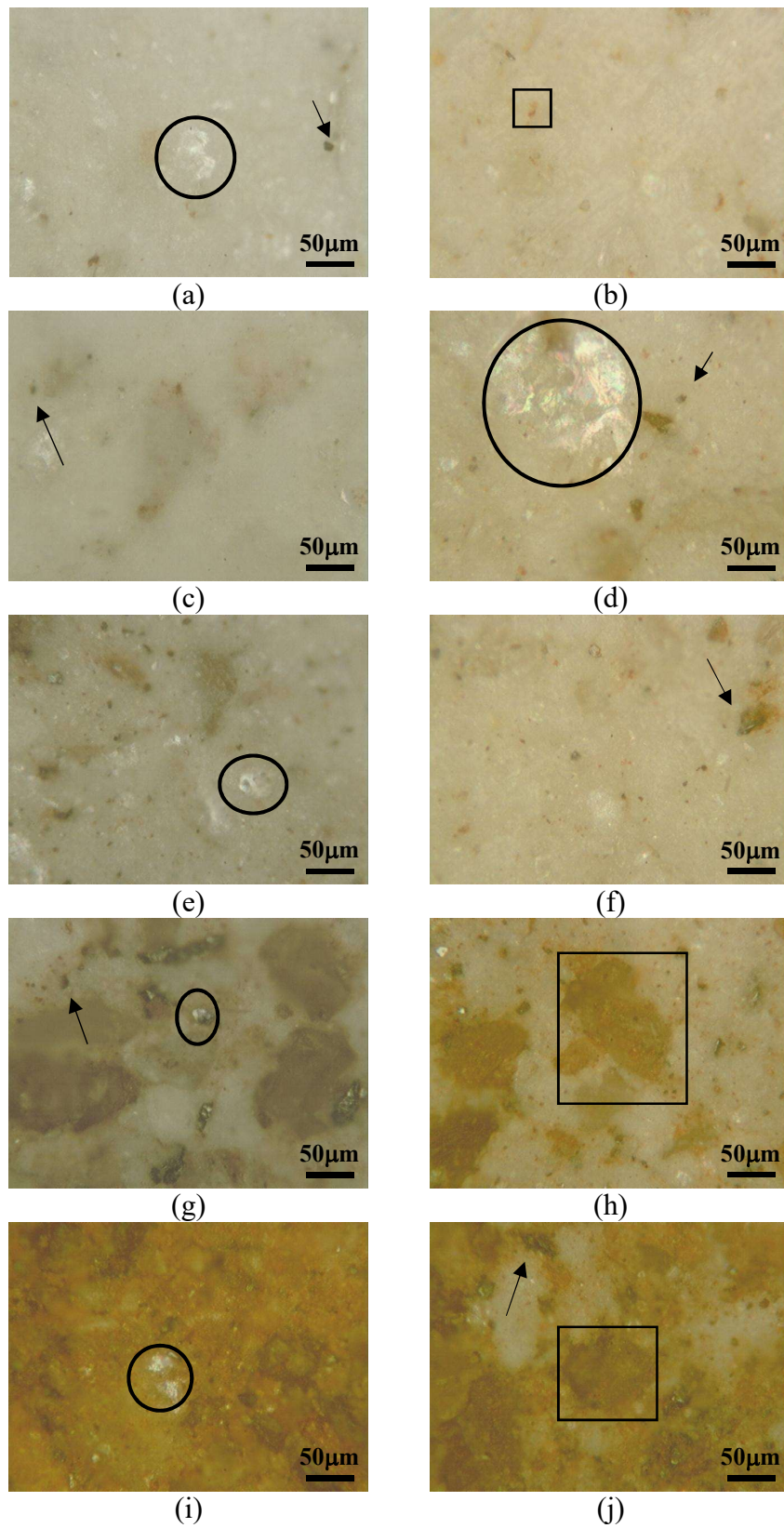
#### 5.3.1 Microscópio óptico (MO)

As micrografias de MO estão representadas nas Figuras 16 e 17. A primeira coluna se refere aos corpos de prova sinterizados à 900°C e a segunda coluna se refere aos corpos de prova sinterizados à 1100°C.

O quartzo (círculos pretos) se destaca como pontos brilhantes em todas as composições. Observa-se uma cor mais avermelhada nas cerâmicas com argila Terracota devido ao teor mais acentuado de óxidos de ferro conforme indicado na composição química (FRX). Além disso, é observada a presença de partículas pretas (setas), provavelmente compostos de ferro, partículas avermelhadas (quadrado), provavelmente hematita oriunda possivelmente da desidratação do hidróxido de ferro. Este resultado é corroborado pelo estudo realizado por Vieira e Monteiro, 2004. Sabe-se também que o quartzo e a hematita podem atuar como partículas inertes e se tornarem pontos concentradores de tensão, ocasionando o aparecimento de trincas que podem comprometer a resistência do material (Vieira e Monteiro, 2004). Porém, em nenhuma das micrografias foram observadas a presença de trincas.

Pode-se afirmar também que a confecção e a sinterização dos corpos de provas foram realizadas de forma satisfatória, pois, a ausência de trinca é um indicativo de que a carga utilizada na prensagem (9T), a granulometria das matérias-primas, a porcentagem de água (8%) adicionada para fornecer plasticidade, a temperatura de secagem (150°C) e sinterização (900 °C e 1100 °C) e o tempo de residência nos fornos foram adequados.

Figura 16 - Micrografia das amostras com argilas Cinza e diferentes teores de rejeito.

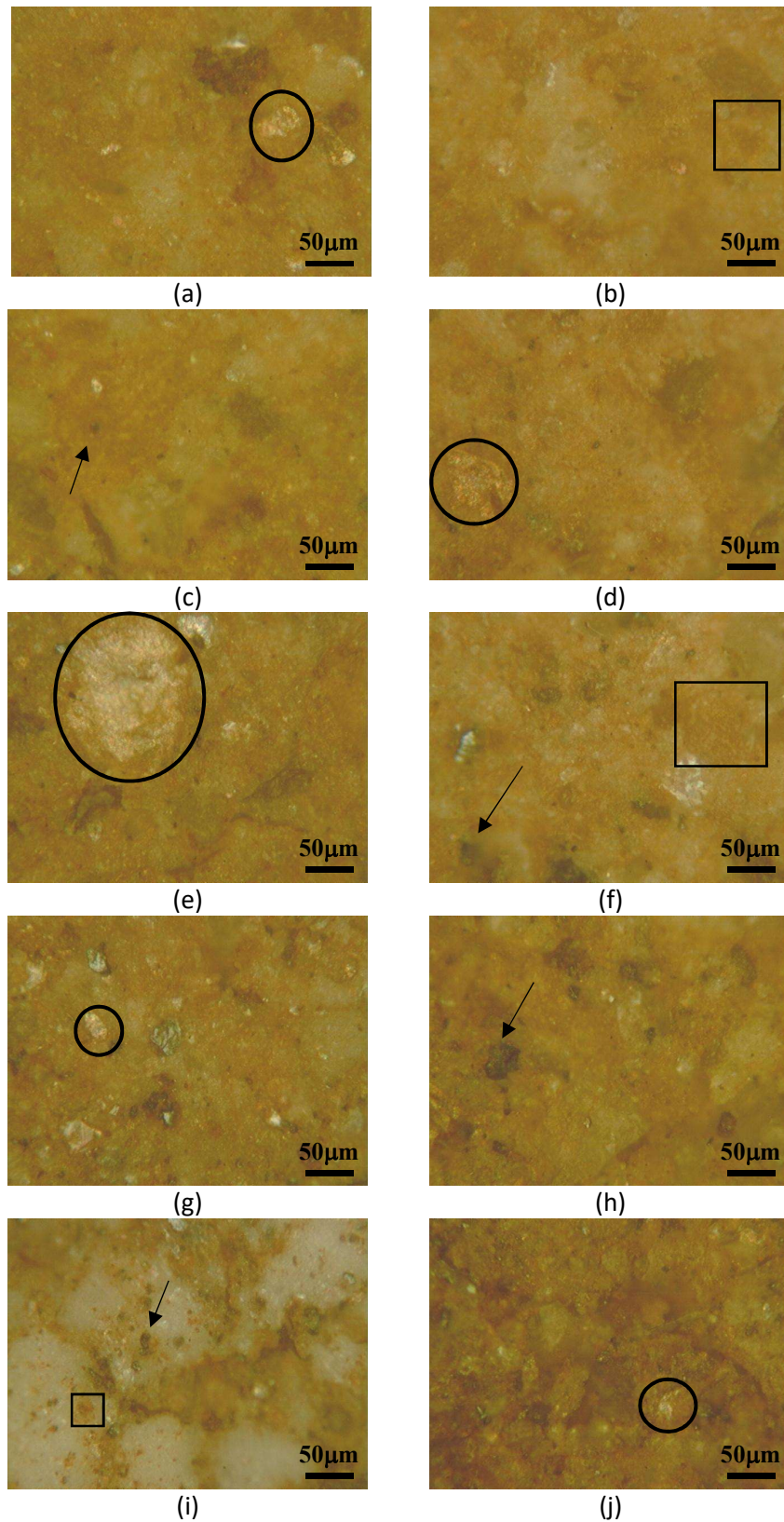


Teor de rejeito: (a) e (b) – 0%, (c) e (d) – 5%, (e) e (f) – 10%, (g) e (h) – 25%, (i) e (j) - 50%.

Fonte: Própria autora.



**Figura 17 - Micrografia das amostras com argilas Terracota e diferentes teores de rejeito.**



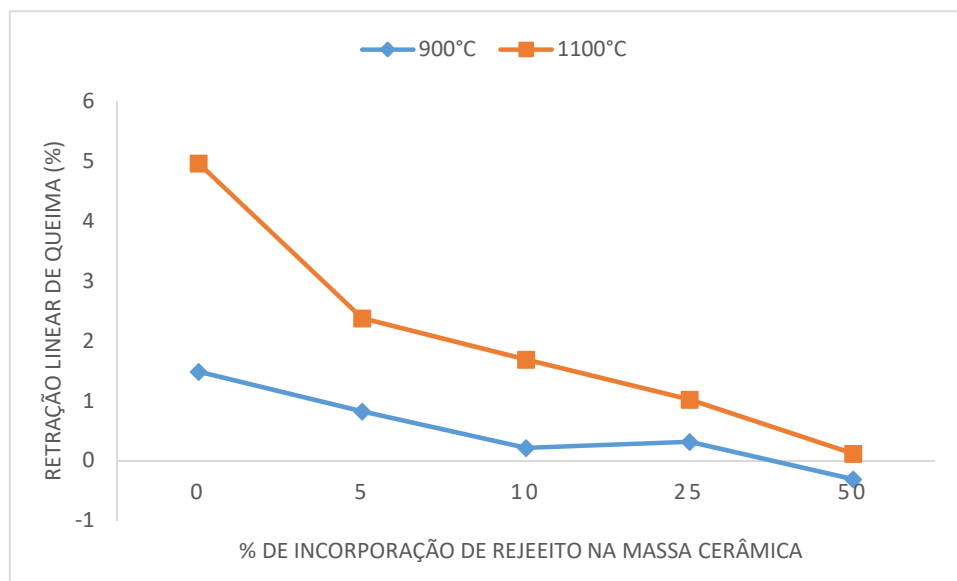
Teor de rejeito: (a) e (b) – 0%, (c) e (d) – 5%, (e) e (f) – 10%, (g) e (h) – 25%, (i) e (j) - 50%.

Fonte: Própria autora.

### 5.3.2 Retração linear

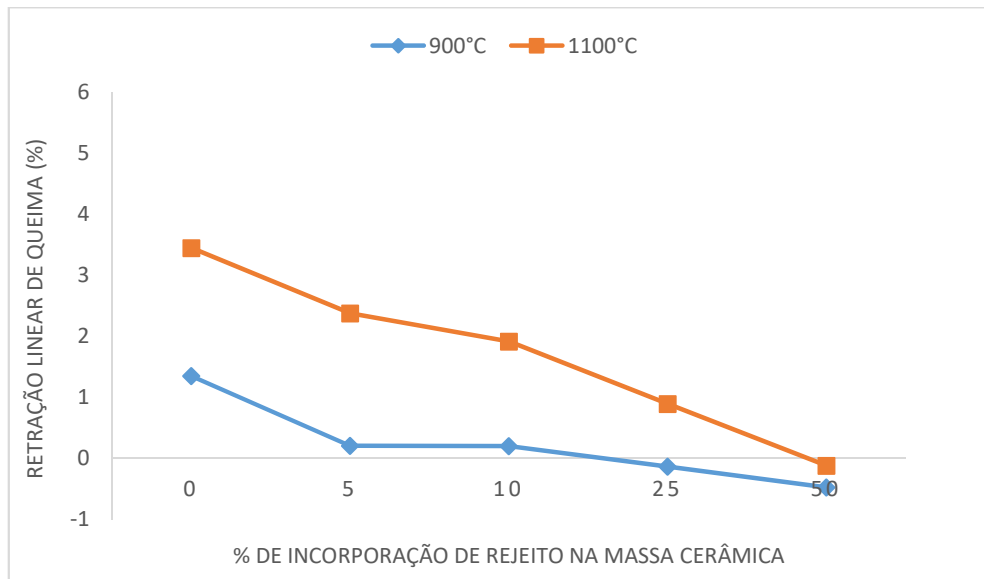
Considerando os resultados obtidos, houve redução da retração linear da queima com o aumento da incorporação de 5% e 10% de rejeito na massa cerâmica, para ambas as argilas, como pode ser observado nas Figuras 18 e 19. Esta diminuição da retração está relacionada à composição dessa massa cerâmica, pois à medida que se aumenta a porcentagem do rejeito, aumenta-se a concentração de materiais não plásticos, tais como o quartzo. Esses materiais não sofrem as mesmas reações físico-químicas e transformações de fase da caulinita e durante a sinterização, leva-se a uma diminuição global da retração dos corpos (SOUZA; HOLANDA, 2003). Ressalta-se que, de acordo com Carvalho (2015), essa redução da retração pode contribuir para a diminuição dos defeitos dimensionais nas peças e diminuição do aparecimento de trincas.

**Figura 18 - Retração linear das cerâmicas queimadas com argila Cinza e diferentes teores de rejeito em função da temperatura de queima.**



Fonte: Própria autora.

**Figura 19 - Retração linear das cerâmicas queimadas com argila Terracota e diferentes teores de rejeito em função da temperatura de queima.**



Fonte: Própria autora.

O maior valor de retração linear de queima obtida foi no corpo de prova sem incorporação de rejeito, como já era esperado por ser um corpo de prova constituído somente por argila. Observa-se que o corpo de prova com argila Cinza, à 1100°C, obteve retração linear de 4,9% e o corpo de prova contendo apenas argila Terracota, na mesma temperatura, obteve um valor de retração de 3,4%.

Na temperatura de queima a 900°C, houve menor retração para os corpos de prova composto com ambas as argilas e com 5% e 10% de rejeito, sendo que a argila Terracota apresentou menor retração. Nenhum valor de retração da massa cerâmica com argila Terracota incorporada com diferentes teores de rejeito, à 900°C, atingiu o patamar de 2%, sendo assim, pode-se afirmar que esse resultado é importante para manter um bom controle dimensional das peças produzidas (DIAS, 2016).

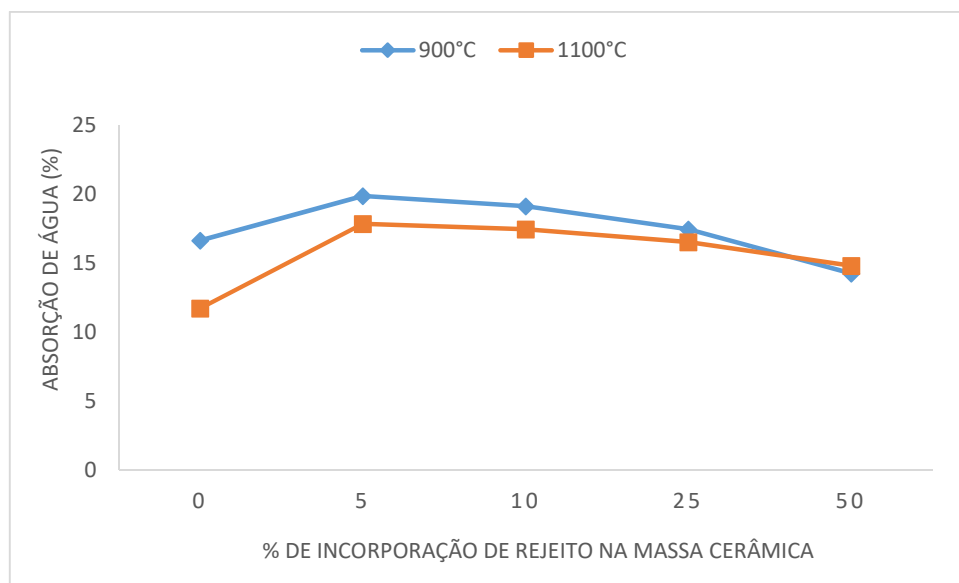
Além dos resultados obtidos de retração, as formulações que continham argila Cinza e 50% de rejeito à 900°C, as formulações com argila Terracota e 25% de rejeito à 900°C e 50% de rejeito, em ambas as temperaturas, tiveram expansão do material. Esse fenômeno pode ser explicado devido à utilização de massas com teores reduzidos de umidade (MELCHIADES, 2001) e pela alta proporção de rejeito inserida na massa.



### 5.3.3 Absorção de água

Os resultados obtidos mostram que há um declínio da absorção de água com a incorporação de rejeito na massa cerâmica com argila Cinza, como pode ser observado na Figura 20. Dentre as massas cerâmicas que receberam incorporação de rejeito, é notável que a massa com 50%, à 900°C, rejeito obteve a menor absorção de água (14%).

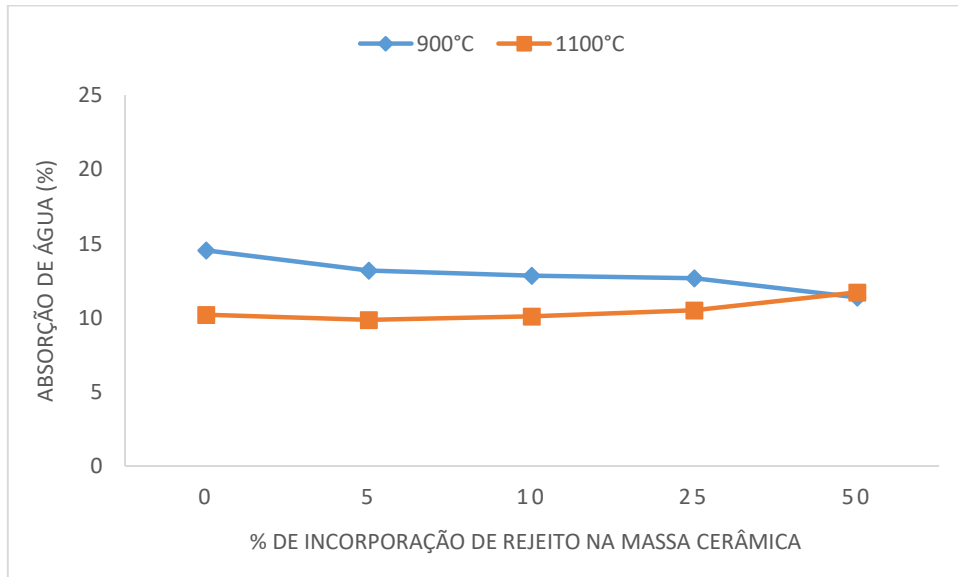
**Figura 20 - Absorção de água das cerâmicas queimadas com argila Cinza e diferentes teores de rejeito.**



Fonte: Própria autora.

Na Figura 21 pode-se observar que houve um declínio da absorção de água com o aumento da incorporação de rejeito à massa cerâmica composta de argila Terracota, sinterizada a 900°C. As absorções de água apresentadas tiveram valores variando de 11% a 14%, sendo que o menor valor se refere à massa com 50% de incorporação de rejeito e o maior valor de absorção de água se refere à massa com argila pura. Diferente deste resultado, a 1100°C houve um aumento da absorção de água da massa cerâmica composta de argila Terracota com diferentes incorporações de rejeito. Apesar disso, esses resultados obtiveram os menores valores de absorção de água (entre 9 a 11%) dentre todas as amostras analisadas.

**Figura 21 - Absorção de água das cerâmicas queimadas com argila Cinza e diferentes teores de rejeito.**



Fonte: Própria autora.

De acordo com as normas ASTM C 902/2006 e a NTC 3829/ 2004, adoquins com valores de absorção em até 14% podem ser utilizados em vias de tráfego veicular leve e tráfego com média e baixa circulação de pedestres, em ambientes que não irão ser expostos ao congelamento. A massa cerâmica com argila Cinza e 50% de rejeito em ambas temperaturas de queima e todas as formulações com argila Terracota e diferentes teores de rejeito, são favoráveis para utilização do adoquim MX (para ambientes sem congelamento) e do Tipo II (com média circulação de pedestres) no Brasil.

## 5.4 Caracterização Mecânica

### 5.4.1 Resistência à Compressão (RC)

A tabela 9 apresenta os valores de resistência à compressão dos corpos de prova em função da quantidade de rejeito incorporado.

**Tabela 9- Valores de resistência à compressão obtidos para cada formulação.**

Formulação	Argila Cinza a 900°C Média (MPa)	Argila Terracota a 900°C Média (MPa)	Argila Cinza a 1100°C Média (MPa)	Argila Terracota a 1100°C Média (MPa)
0%	14,3	31,0	20,9	22,6
5%	15,5	29,1	22,9	23,2
10%	19,7	26,6	30,9	22,3
25%	20,9	27,6	17,3	22,6
50%	33,8	23,8	19,2	12,6

Fonte: Própria autora.

De acordo com as normas internacionais ASTM C 902/2006 e a NTC 3829/ 2004 os corpos de prova compostos por argila Cinza, 5%, 10% de rejeito (sinterizados a 900°C), 25% e 50% de rejeito (sinterizados a 1100°C) não atendem ao requisito mínimo de resistência a compressão, que exigem um valor de resistência superior à 20,7 MPa. Além disso, observa-se que os corpos de prova com argila Terracota com 50% de rejeito (sinterizados a 1100°C), também não atende os requisitos das normas citadas anteriormente. Entretanto, todas as outras composições, com destaque a todas as composições da argila Terracota sinterizadas à 900°C, atendem a norma para a fabricação do adoquim do tipo MX, NX e do tipo III.

Os altos valores de resistência à compressão (até 30MPa) atingidos pelas formulações podem ser explicados devido à redução da porosidade aberta como consequência do preenchimento dos poros com o material não plástico (rejeito), aumentando assim, a resistência mecânica da massa cerâmica (CARVALHO, 2015). Esses valores elevados de resistência à compressão são contrários dos encontrados na literatura pois, devido à alta quantidade de quartzo presente no rejeito, a diminuição da resistência mecânica era esperada à medida que houve à incorporação do rejeito à argila. Uma vez que, em temperaturas acima de 573°C, o quartzo gera tensões no interior das peças devido à sua transformação alotrópica. Estas tensões são responsáveis pelo aparecimento de microtrincas, que atuam como concentradores de tensão, o que contribuiria para a redução na resistência. (NORTON, 1973; QUEIROZ *et al.*, 2010; AGUIAR, 2012).

A granulometria fina das argilas utilizadas (diâmetros médios das partículas de 15,71µm para a argila Cinza e 18,28µm para Terracota) em conjunto com a maior granulometria do rejeito (diâmetro médio de 39,29µm) provavelmente colaborou para o resultado obtido gerando um melhor empacotamento das peças. Este fato possivelmente foi o principal determinante para

a superação do efeito contraditório do aparecimento de trincas causadas pelo quartzo. (SANTOS, 1989; QUEIROZ *et al.*, 2010; AGUIAR, 2012)

#### 5.4.4 Ensaio de Flexão

Para os valores de flexão não existe norma internacional que especifique um determinado valor para o adoquim. O que existe em termos de norma é para as placas cerâmicas extrudadas do grupo de absorção de água AIII (NBR 13818), cujo valor médio de resistência flexão deverá ser maior ou igual a 8 MPa.

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos no teste de resistência à flexão. Observa-se que as formulações com 5% de incorporação de rejeito e sinterizadas a 1100°C obtiveram os maiores valores de resistência (9,6 MPa para os corpos de prova com argila Cinza e 8,2 MPa para os corpos de prova com argila Terracota), devido ao melhor empacotamento das partículas.

**Tabela 10 - Valores de resistência à flexão obtido para cada formulação.**

Formulação	Argila Cinza a 900°C Média (MPa)	Argila Terracota a 900°C Média (MPa)	Argila Cinza a 1100°C Média (MPa)	Argila Terracota a 1100°C Média (MPa)
5%	5,3	5,7	9,8	8,2
10%	6,1	3,9	7,3	6,5
25%	3,4	3,8	4,9	3,9
50%	1,4	1,8	2,5	2,5

Fonte: Própria autora.

#### 5.4.5 Índice de abrasão

Os resultados obtidos para o índice de abrasão são mostrados na Tabela 11. Pode-se observar que os índices de abrasão, para corpos de prova confeccionados com a argila Terracota com 5%, 10%, 25% e 50% de rejeito (exceto o corpo de prova com 50% de rejeito e sinterizado a 1100°C) e os corpos de prova compostos com a argila Cinza e com 5%, 10%, 25% e 50% de rejeito (sinterizados a 1100 °C), são satisfatórios em relação ao tipo III, para um pavimento com baixa circulação de pedestres, como em quintais e pisos de casas familiares (norma NTC 3829/2004).

Observa-se também que os menores valores (0,3) obtidos são dos corpos de prova que obtiveram maior resistência à compressão (Tabela 8), isso se deve ao fato do material com maior resistência à compressão possuir maior resistência ao desgaste.

Além disso, pode-se observar que os corpos de prova compostos pela argila Cinza com incorporação 5%, 10%, 25% de rejeito (sinterizados à 900°C) obtiveram valores acima dos citados pela norma NTC 3829/2004.

**Tabela 10 - Dados de índices de abrasão.**

Formulação	Argila Cinza à 900°C	Argila Cinza Cinza à 1100°C	Argila Terracota à 900°C	Argila Terracota à 1100°C
0%	0,8	0,4	0,3	0,3
5%	0,9	0,5	0,3	0,3
10%	0,7	0,4	0,3	0,3
25%	0,6	0,4	0,3	0,3
50%	0,3	0,5	0,3	0,6

Fonte: Própria autora.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que o rejeito proveniente do rompimento da barragem do Fundão (Bento Rodrigues, distrito de Mariana – MG), coletado às margens do Rio do Carmo, pode ser utilizado como matéria prima na produção do adoquim, sendo assim um potencial para a substituição do pré moldado de concreto, hoje o mais utilizado no Brasil.

A análise do MEV mostrou microestruturas de partículas muito semelhantes entre as amostras analisadas, com predominância de partículas de morfologia irregular, associada a presença de argilominerais e minerais de ferro presentes nas matérias-primas.

O FRX mostrou que as argilas são compostas principalmente de  $\text{SiO}_2$  e que a argila Terracota possui um teor mais elevado de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o que resultou em corpos de prova com uma cor mais avermelhada. Através da análise da composição química foi comprovado que o rejeito possui um valor de 58,6% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

O DRX das argilas confirmou a presença predominante de quartzo, caulinita e muscovita em ambas e um pico característico da hematita no DRX da argila terracota. O DRX do rejeito confirmou a presença de minerais de ferro, através dos picos característicos de hematita e goethita.

As formulações escolhidas tiveram resultado satisfatório quanto à análise visual pois não foi observado a formação de trincas nos corpos de prova, devido ao maior grau de empacotamento das partículas. Entretanto, os corpos de prova com incorporação de rejeito de 75% e 100% sofreram fratura após a sinterização, sendo assim, os mesmos foram descartados. Pela análise visual, também pode-se concluir que, à medida em que se aumentou o teor de rejeito à massa cerâmica o corpo de prova adquiriu uma cor mais rústica, umas das características do adoquim.

Os menores valores obtidos de retração linear da queima foram referentes aos corpos de prova sinterizados à  $900^\circ\text{C}$  e com os maiores teores de incorporação de rejeito. Quando não há uma variação significativa da retração linear, pode-se concluir que há um maior controle das dimensões do material, diminuindo assim os defeitos dimensionais e também a formação de trincas.

A incorporação de rejeito na massa cerâmica contribui para uma diminuição da absorção de água. Os resultados de absorção mais satisfatórios foram das massas cerâmicas com 50% de rejeito. Em ambas temperaturas de queima da massa cerâmica com argila cinza com 50% de incorporação, os índices foram de 14%. Valores menores de absorção foram encontrados para

os corpos de prova com argila Terracota. Em ambas temperaturas, a absorção de água foi de 11%. Os corpos de prova com argila Terracota, em ambas temperaturas de queima, com incorporações de rejeito de 5, 10, 25%, atendem o requisito da norma americana, que intitula um valor máximo de 14% de absorção de água para os adoquins.

Com relação à resistência à compressão, os corpos de prova com argila cinza com 0%, 5% e 10% de incorporação de rejeito sinterizados a 900°C, com 25 e 50% de incorporação sinterizados a 1100°C e os corpos de prova com argila Terracota com 50% de incorporação de rejeito, a 1100°C, não atenderam os requisitos mínimos das normas americana e colombiana. Entretanto, todas as outras formulações possuem resistência mecânica acima do estipulado pelas normas, de 20,7MPa, podendo assim ser utilizados em ambientes externos não expostos ao congelamento e ambientes internos.

Os valores obtidos de resistência à flexão dos corpos de prova com argila Cinza e Terracota com incorporação de 5% de rejeito, com temperatura de sinterização de 1100°C, são os únicos maiores que 8MPa, atendendo assim a norma para placas cerâmicas extrudadas.

Os resultados de índice de abrasão mostram que a incorporação desse tipo de rejeito em massas cerâmicas para produção de adoquins é viável, entretanto, necessita-se ainda de mais estudos relacionados a outros tipos de argila, a carga de compressão, umidade da massa e processo de sinterização, para poder adequá-lo ao tipo I e II (norma NTC 3829/2004).

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEL, A. **Caracterização de argilas para uso em saúde e estética**. Trabalho de conclusão de curso. 2009. 46f. Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

ABRAÃO, P. C. **Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil**. p. 1-9. Simpósio sobre barragens de rejeito e disposição de resíduos industriais e de mineração, Rio de Janeiro, 1987.

**Abrasão, 2016**. Disponível em <<http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-abrasao.html>>. Acesso em: 22/11/2016.

**Adoquim: Uma alternativa ecológica para a fabricação de cerâmica**. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2012/02/28/adoquim-uma-alternativa-ecologica-para-a-fabricacao-de-ceramica>>. Acesso em 21 abril 2016.

Agência Brasil, 2015. **Áreas afetadas por lama de barragem não estão aptas para agropecuária, 2015**. Disponível em: <<http://www.correio24horas.com.br/detalhe/noticia/areas-afetadas-por-lama-de-barragem-nao-estao-aptas-para-agropecuaria-dizestudo/?cHash=a47d0bc1cbb0d9e133ca681551251527>> Acesso em 21 abril 2016.

AGUIAR, M. C. **Utilização do resíduo de serragem de rocha ornamental com tecnologia de fio diamantado em cerâmica vermelha**. 2012. 133f. Tese (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

Aiqing, W., Chengzhi, Z., Ningsheng, Z. The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement, **Cement Concrete Research**. **29**, 11, 1999. P.1721-1726.

ALMEIDA, D. C.; LOUREIRO, C. O. Disponibilidade hídrica subterrânea nos rejeitos de beneficiamento do minério de ferro – caso da barragem do Pontal, em Itabira, Minas Gerais.



In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008.

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) - Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ASSIS, A. **Construção de barragens de rejeito sob uma visão geotécnica.** p. 259-273. Anais do III Simpósio sobre barragens de rejeito e disposição de resíduos, Ouro Preto - MG, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). ABNT NBR NM 30 2000. **Agregado miúdo – determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro.

BARBOSA, I. O.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R. Relações pedomorfogeológicas nas chapadas elevadas do Distrito Federal. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.33, n.5, p.1373 – 138, 2009.

BEREZOWSKI, L. R.; NETO, C. D. M.; MELO, F. C. L. D. **Avaliação da resistência mecânica de cerâmicas à base de carbetto de silício.** Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Mecânica, 2002.

CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.** 2011. 106f. Tese (Mestrado) - Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CANDIDO, V. S. **Utilização de argilito e chamote de blocos de vedação na composição de massa de pavimento intertravado cerâmico adoquim.** 2012. 129f. Tese (Mestrado) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ.

CANDIDO *et al*, Desenvolvimento de adoquim cerâmico com argilas cauliníticas, chamote e argilito. **Cerâmica**, vol.59, p.310-316, 2013.

CARVALHO, J. P. R. G. **Estudo dos parâmetros técnicos do adoquim cerâmico com incorporação de resíduo de rocha ornamental**. 2015. 126f. Tese (Mestrado) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.

CARVALHO, J. P. R. G.; VIEIRA, C. M. F. **Estudo dos parâmetros técnicos do adoquim cerâmico com incorporação de resíduo de rocha ornamental**. In: I ENCONTRO DE ENGENHARIA, CIÊNCIA DE MATERIAIS E INOVAÇÃO DO RIO DE JANEIRO, 2015, Nova Friburgo. **Anais...** Nova Friburgo: I ENCONTRO DE ENGENHARIA, CIÊNCIA DE MATERIAIS E INOVAÇÃO DO RIO DE JANEIRO, 2015.

CARRISSO, R. C. C.; CORREIA, J. C. Classificação e peneiramento. **Tratamento de Minérios**, v. 4, p.197-238, 2004.

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

**Conorsa**. Disponível em: < <http://www.conorsa.es>>. Acesso em 21 abril 2016.

CRUZ, M. M. Disponível em: < <http://www.em.com.br>>. Acesso em 23 abril 2016.

CULLITY, B.D.; STOCK, S.R. **Elements of X-Ray Diffraction**. 3ª ed., Foxboro: Prentice Hall, 664 p., 2001.

**Desastre ambiental em Mariana**. Disponível em: < [g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/2016/02/](http://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/2016/02/)>. Acesso em: 21 abril 2016.

DIAS, E. G. C. S. **Avaliação de impacto ambiental de projetos de mineração no estado de São Paulo: a etapa de acompanhamento**. 2001. 303p. Tese (Doutorado) - Engenharia Mineral, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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.

EFFTING, C. **Laboratório de materiais de construção II**. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 45 p., 2014.

EXNER, E. Principles of Single Phase Sintering, Reviews on Powder Metallurgy and Physical **Ceramics**, 1, p.1- 4. 1979.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e meio ambiente no Brasil. Relatório para o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), 2002.

FIGUEIREDO, M.M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG**. 2007. 100f. Tese (Mestrado) – Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

GOES, M. A. C.; LUZ, A. B.; POSSA, M. V. C. Amostragem. **Tratamento de Minérios**, v. 5, p.23-56, 2010.

IBAMA . **Laudo técnico preliminar**. p.1-25, Brasília. 2015.

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

INSTRON. Disponível em: <<http://www.instron.com.br/pt-br/testing-solutions/by-test-type/compression/concrete-cylinders>>. Acesso em 23 de abril 2016

JENKINS, R. Instrumentation. In: Modern Powder Diffraction. Mineralogical Society of America. **Reviews in Mineralogy**, v.20, cap.2, p.19-43. 1989.

JESUS, C. A. G. **Ferro**. Departamento Nacional de Produção Mineral – MG, 2015.

KESRENBACHK, H.J. **Microscopia eletrônica transmissão e varredura**. São Paulo: ABM, 1994.

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.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando método de análise hierárquica**. 2006. 128f. Tese (Mestrado) – Engenharia Geotécnica, Universidade do São Paulo, São Paulo.

LEHMKUHL, W.A. **Análise numérica e experimental de um secador contínuo tipo túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha**. 2006. 129f. Tese (Pós-graduação) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MALPESA. Disponível em: <[http://www.malpesa.es/en/area\\_descarga.jsp](http://www.malpesa.es/en/area_descarga.jsp)>. Acesso em 23 Abril de 2016

MALVERN, Instruments Limited. **A Basic Guide to Particle Characterization**. 2012.

Mapa do local da coleta da mostra de rejeito. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>> Acesso em 3 de dezembro de 2016.

MELCHIADES, F. G., et al. Controle dimensional e do formato de revestimentos cerâmicos. Parte I: Dimensões. **Cerâmica Industrial**, v.6, n.5, p.27-33, Setembro/Outubro, 2001.

MEND. **Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials**. MEND Report 1.20.1, versão 0. Dez, 2009.

MENDES, J. J., et al. **Caracterização tecnológica de rejeito ultrafino de minério de ferro proveniente do processo de beneficiamento**. Departamento de engenharia de Produção- Instituto Federal Minas Gerais – IFMG. 2013.

MENEZES, R.R., et al. Análise da expansão por umidade e absorção de água de pisos cerâmicos comerciais em relação à composição química e à quantidade estimada de fase vítrea. **Cerâmica**, v.49, p.72-81, 2003.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.303-313. 2002.

MOTTA, H. P. **Comportamento de um rejeito de transição em centrífuga geotécnica**. 2008. 152f. Tese (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MOTTA, P. E. F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J.C. & PEREIRA, N.R. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do planalto central brasileiro. **Pesq. Agropec. Bras**, v.37, p.869-878, 2002

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C. L.; ALCOVER-NETO, A. Caracterização Tecnológica de Minérios. **Tratamento de Minérios**, v. 4, p. 55-112, 2004.

PASSOS, N. C. S. T. **Barragem de rejeito: Avaliação dos parâmetros geotécnicos de rejeitos de minério de ferro utilizando ensaios de campo – Um estudo de caso**. 2009. 93f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba

PEREIRA, E, L. **Estudo do Potencial de liquefação de resíduos de minério de ferro sob carregamento estático**. 2005. 210f. Tese (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

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**, v. 45, p. 3621-3630, 2011.

PORTLAND, Associação Brasileira de Cimento. **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, São Paulo, 36p. 2010.

PRICE, W. **Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials (Mend Report 1.20.1)**, 2009.

QUEIROZ, L. F. et al. Efeito da utilização de areia no processamento e nas propriedades de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 56, p.279-284, 2010.

**Resistência à abrasão, 2016.** Disponível em: <[http://ctborracha.com/?page\\_id=1698](http://ctborracha.com/?page_id=1698)>.

Acesso em 22 de novembro de 2016.

RIBEIRO, M. M. **Material particulado de planta de sinterização de usina siderúrgica integrada em composição de massa de cerâmica vermelha.** 2010. 145f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

SANTIS, B. C. **Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do Estado de São Paulo.** 2012. 144f. Tese (Mestrado) – Arquitetura e Urbanismo, Instituto de arquitetura e urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SANTOS, C. M. F. **Quantificação de fases argilominerais em matérias primas cerâmicas pelo método de Rietveld.** 2013. 152f. Tese (Doutorado) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SANTOS, D. A., et al. **Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro.** Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.

SANTOS, I.B., et al. Transporte de massa em sólidos com forma arbitrária via método integral baseado em galerkin usando condição de contorno convectiva. **Mecânica Computacional**, v. 29, p.2865-2881, 2010.

SANTOS, I. J. **Estudo da produção de concentrados de minério de ferro a partir dos rejeitos da barragem de Germano.** 2003. Tese (Mestrado) – Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2003.

Santos P. S. **Ciência e Tecnologia das Argilas**, vol 1. Edgard Blücher: São Paulo.1989.

SILVA, A. G. P., ALVES JUNIOR, C. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e sinterizadas por fluxo viscoso. **Cerâmica**, v.44, n.290, nov./dez. 1998.

SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. C. **Resíduos sólidos da atividade de mineração**. Caderno de Diagnóstico. 41p, 2011.

SOARES, J. M. D. et al. Panorama Socioeconômico das Indústrias de Cerâmica Vermelha da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CREÂMICAS – 2004, Curitiba. **Anais...** Curitiba: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2004.

SOUZA, G. P.; HOLANDA, J. N. F. Comportamento de sinterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero. **Cerâmica**, v.49, p.128-132, 2003.

SOUZA, V. P. **Análise dos gases emitidos na produção de cerâmicas com adição de resíduos industriais**. 2007. 74f. Tese (Mestrado) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

STEFANAKI, E. **Electron Microscopy: The Basics**. Physics of Advanced Materials Winter School. 2008.

VICTORINO, M. M. **Barragem de rejeito: Caracterização de parâmetros geotécnicos visando análises de estabilidade – Um estudo de caso**. 2007. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. **Effect of the particle size of the grog on the properties of bricks**. In: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2009, p.249–254.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F.; PINATTI, D. G. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ. **Cerâmica**, v. 46 n° 297, Jan./Feb./Mar, 2000.

VIEIRA, C. M. F, et al. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot. **Cerâmica**, v.8, pg.42-46, 2003.

VIEIRA, C. M. F.; SOUZA, E. T. A.; MONTEIRO, S. N. Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, n° 50, p.254–260, 2004.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. **Effect of the particle size of the grog on the properties of bricks**. In: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), p.249–254, 2009.

WILLS, B. A. **Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. Oxford [Oxfordshire]; New York: Pergamon Press, 785p., 1988.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. **Mineral Processing Technology**. An Introduction of the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 498p, 1979.

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.