



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

CECÍLIA BORGES SEVERO

**APROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO
PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS CERÂMICOS**

ARAXÁ/MG

2019

CECÍLIA BORGES SEVERO

**APROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO
PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS CERÂMICOS**

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

Orientador: Prof. Dr. Fábio de São José

Coorientador: Prof^a. Me. Kelly de Souza Pires

ARAXÁ/MG

2019

CECÍLIA BORGES SEVERO

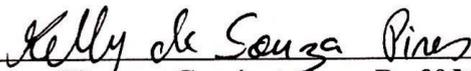
**APROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA FABRICAÇÃO
DE TIJOLOS CERÂMICOS**

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

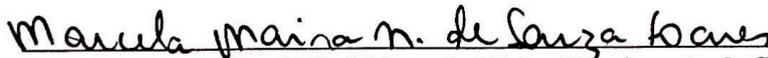
Araxá, 06 de dezembro de 2019



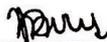
Presidente e Orientador: Prof. Dr. Fábio de São José
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular e Coorientadora: Prof.ª Me. Kelly de Souza Pires
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof.ª Dr.ª Marcela Maira Nascimento de Souza Soares
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Esp. Mariana Pires
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Jeová Deus pela vida e por ter me dado forças para persistir mesmo em momentos muito difíceis, que pensei que não seria possível continuar.

Agradeço aos meus pais, Dalva e Nilson, pelo amor incondicional que sempre demonstraram por mim. Obrigada pela base e apoio que me deram desde bem pequena.

Mãe, obrigada por ser esse grande exemplo, me ensinando a ter a determinação necessária para cumprir todos os meus objetivos. Como disse Rory Gilmore: *"I don't know if she ever realized the person I most wanted to be was her. Thank you, Mom. You are my guidepost for everything."*

Agradeço aos amigos que fiz no CEFET, em especial Laura e Mário, por sempre me apoiar e ajudar. Aos demais amigos e familiares que estiveram ao meu lado nesse percurso, minha gratidão. Amo vocês.

Aos professores que me auxiliaram na realização desse trabalho, seja por ajuda teórica ou prática, em especial Alexander, Fábio e Kelly: muito obrigada, vocês foram essenciais.

Agradeço à Ana Carolina, por aceitar estagiar comigo, estando sempre disposta a ajudar e a engrandecer esse trabalho. Foi um prazer trabalhar com você.

RESUMO

O beneficiamento mineral gera um grande volume de rejeitos, geralmente depositado em barragens. As barragens podem apresentar custos elevados, impactos ambientais ou sociais e situações de risco. Por causa disso surge o aproveitamento de rejeitos, tentando reduzir danos, o descarte no meio ambiente e o desperdício de materiais. Portanto, o objetivo deste trabalho é a caracterização de um rejeito de minério de ferro de Catas Altas-MG e a sua utilização na fabricação de tijolos cerâmicos. Os tijolos foram feitos com diferentes porcentagens de substituição de rejeitos (0%, 5% e 15%) e distintas temperaturas de queima (natural, 850°C e 1000°C). O rejeito utilizado apresenta aproximadamente 80% de quartzo e 76% das partículas são menores que 149 µm. Os resultados obtidos nos testes qualitativos foram satisfatórios, sendo os tijolos com 15% de substituição os melhores com relação à aparência, facilidade de tirar da fôrma e dureza. A maior dureza foi obtida nos tijolos de 15% de substituição queimados a 1000°C.

Palavras-chave: beneficiamento mineral; aproveitamento de rejeitos; tijolos cerâmicos.

ABSTRACT

Mineral processing generates a large volume of waste, usually deposited in dams. Dams can have high costs, environmental or social impacts and risk situations. Because of this appears the use of waste, trying to reduce damage, disposal in the environment and waste of materials. Therefore, the objective of this work is the characterization of an iron ore waste from Catas Altas-MG and its use in the manufacture of ceramic bricks. The bricks were made with different waste replacement percentages (0%, 5% and 15%) and different firing temperatures (natural, 850°C and 1000°C). The waste used has approximately 80% quartz and 76% of the particles are smaller than 149 µm. The qualitative test results were satisfactory, with the 15% replacement bricks being the best in appearance, facility of form removal and rigidity. The highest rigidity was achieved on 15% replacement bricks burned at 1000°C.

Key words: mineral processing; use of waste; ceramic bricks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Situação de barragens no Brasil e danos associados.....	14
Figura 2: Relação de barragens inseridas na PNSB e suas respectivas classificações.	15
Figura 3: Fluxograma das etapas de caracterização mineral.	20
Figura 4: Grau de liberação de partículas minerais.	21
Figura 5: Participação de substâncias metálicas no valor comercializado (2016)	23
Figura 6: (A) Amostra submetida à pulverização; (B) Retirada de retidos da peneira após pulverização.....	32
Figura 7: Componentes da fôrma utilizada para fabricação dos tijolos.	34
Figura 8: Fôrma montada utilizada na fabricação dos tijolos.	34
Figura 9: Testes realizados para a fabricação dos tijolos, com auxílio do professor Alexander. (A) Prensagem do molde; (B) Retirada do tijolo do molde.	35
Figura 10: Utilização do paquímetro para medição do comprimento e cálculo de retração.	37
Figura 11: Processo para obtenção do tempo de absorção: (A) Água sendo aplicada ao tijolo; (B) Água totalmente absorvida.	38
Figura 12: Composição mineralógica do rejeito obtido por MQE.	40
Figura 13: Mapa de fases da amostra obtida por MQE.	41
Figura 14: Campos de análises obtidos por MQE: (A) Região 1 analisada; (B) Região 2 analisada.....	42
Figura 15: Gráfico de distribuição granulométrica acumulada.	44
Figura 16: Gráfico de distribuição granulométrica por fase.	46
Figura 17: Tijolos fabricados com 0%, 5% e 15% de substituição, respectivamente (de cima para baixo).	47
Figura 18: Tijolos após os processos de queima e secagem. Da esquerda para a direita: secagem natural, 850°C, 1000°C.	48
Figura 19: Gráfico para comparação de resultados de retração.	50
Figura 20: Gráfico para comparação de resultados de perda mássica.	51
Figura 21: Dureza média.	53
Figura 22: Tempo médio de absorção.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação de barragens segundo a ANM.....	15
Tabela 2: Relação de trabalhos de reutilização de rejeitos e suas possíveis aplicações.	18
Tabela 3: Propriedades dos principais minerais de ferro das classes óxidos, carbonatos e sulfetos.	24
Tabela 4: Propriedades importantes de óxidos de ferro (Goethita, Hematita e Magnetita).	24
Tabela 5: Produtos cerâmicos, matérias-primas e processos utilizados.	29
Tabela 6: Relação de massas destinadas a cada teste e local de realização..	32
Tabela 7: Quantidades de materiais utilizados na fabricação dos tijolos.	35
Tabela 8: Resultados obtidos pela picnometria manual.	39
Tabela 9: Distribuição granulométrica obtida por MQE.	43
Tabela 10: Distribuição granulométrica por mineral constituinte da amostra obtida por MQE.	45
Tabela 11: Resultado para retração.	49
Tabela 12: Resultado para perda mássica.	51
Tabela 13: Dados obtidos de dureza.....	53
Tabela 14: Resultados de tempo de absorção.	54

SIGLAS

- ANM – Agência Nacional de Mineração;
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral;
- DRX – Difractometria de Raios X;
- EAA – Espectrofotometria de Absorção Atômica;
- EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva;
- EOE – Espectrografia Óptica de Emissão;
- EP – Espectrometria de Plasma;
- FRX – Fluorescência de Raios X;
- ME – Microsonda Eletrônica;
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura;
- MO – Microscopia Óptica;
- MQE – Mineralogia Quantitativa Eletrônica;
- NRM – Norma Regulamentadora na Mineração;
- PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. BARRAGENS DE REJEITOS E MEIO AMBIENTE	13
2.2. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	18
2.2.1. MINÉRIO DE FERRO	23
2.3. MATERIAIS CERÂMICOS	25
2.3.1. DEFINIÇÕES	26
2.3.2. PROPRIEDADES	26
2.3.3. FABRICAÇÃO DE CERÂMICAS	28
3. METODOLOGIA.....	30
3.1. OBTENÇÃO DE AMOSTRAS	30
3.2. CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS	30
3.3. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	31
3.4. ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	33
3.5. TESTES EM LABORATÓRIO	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	39
4.1.1. RESULTADOS MQE	40
4.2. DESEMPENHO DOS TIJOLOS	46
4.2.1. ASPECTOS GERAIS.....	47
4.2.2. RETRAÇÃO.....	48
4.2.3. PERDA MÁSSICA AO FOGO.....	50
4.2.4. DUREZA	52
4.2.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA	54
5. CONCLUSÕES	56
6. REFERÊNCIAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

Após os processos de lavra e beneficiamento mineral há a consequente geração de rejeitos, parte do minério que não possui valor econômico agregado e cuja deposição é geralmente feita por meio de barragens, sendo elas estruturas de contenção (SOARES, 2010).

Para a construção segura das barragens, precisa-se levar em consideração o material a ser minerado, bem como as propriedades do solo e condições climáticas da região, conforme destaca Bates (2002). Afinal, são critérios que interferem diretamente na estabilidade da barragem e seu consequente fator de segurança.

Atualmente nota-se uma crescente demanda de minérios, o que resulta em um consequente aumento na dimensão das barragens e pode ocasionar elevação nos custos de produção. Infelizmente algumas empresas buscam redução de tais custos e utilizam tais estruturas de contenção de forma inadequada, podendo ocasionar acidentes e rupturas.

Para maior segurança das barragens, são necessários estudos com relação ao material utilizado nos seus alteamentos, caracterização do material a ser depositado nessas estruturas e controle do volume de água.

Floculantes são adicionados ao processo de espessamento para que as partículas se aglomerem, facilitando o processo de sedimentação. Por esse motivo, esses aditivos são utilizados para aumentar a porcentagem de sólidos dos rejeitos, que passam a ser mais pastosos (SALES, 2012). Em muitos casos espessamentos com altas dosagens de floculantes apresentam custos elevados, sendo inviáveis especialmente para empresas de pequeno porte.

Além disso, licenciamentos ambientais passam a ser mais difíceis de serem obtidos, devido aos impactos ambientais, visuais e situações de risco gerados pela construção de barragens. Sendo assim, são necessários estudos avaliando novas formas de reduzir o volume de rejeitos estocados. Recentemente, no Brasil, mais especificamente no estado de Minas Gerais,

houveram acidentes graves relacionados ao tema, o que reafirma a necessidade de estudos na área.

Neste contexto surge o aproveitamento de rejeitos, buscando a transformação destes em materiais aproveitáveis, com valor agregado, além de benefícios ambientais e vantagens econômicas para as indústrias (SILVA, 2014; MACHADO, 2018).

Inicialmente, neste trabalho, foi feito um levantamento com relação a estudos já realizados sobre a utilização de rejeitos, buscando embasamento teórico para a elaboração do projeto. Dentre os rejeitos estudados estão aqueles de minério de ferro, carvão, esmeralda, ardósia, calcário, manganês e caulim, sendo a grande maioria aplicada na construção civil.

Por fim, o objetivo deste estudo é avaliar a aplicabilidade do rejeito de minério de ferro na fabricação de tijolos cerâmicos. Para tal, é necessária a realização de uma caracterização mineral, incluindo análise da distribuição granulométrica, determinação da massa específica e análise mineralógica, buscando informações sobre o rejeito.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. BARRAGENS DE REJEITOS E MEIO AMBIENTE

A produção mineral gera um grande volume de rejeitos após o beneficiamento de minérios. Algumas barragens no Brasil possuem capacidades superiores a 3 milhões m³, segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), em fevereiro de 2019. Esse problema é agravado no processamento de alguns minérios, como: ouro, cobre, fosfato, carvão e ferro. A deposição de tais rejeitos é feita geralmente em barragens, que devem seguir exigências de proteção ao meio ambiente e também de segurança (SOARES, 2010).

Soares (2010) destaca que o rejeito é definido como a parte do minério que não possui valor econômico agregado, sendo resultado das etapas de beneficiamento. Portanto, os rejeitos apresentam características variáveis de acordo com o tipo de minério e processos aplicados.

Barragens podem ser definidas como estruturas de contenção feitas a partir de um dique de partida constituído de terra compactada ou enrocamento, com alteamentos sucessivos realizados com a utilização do próprio rejeito (RIBEIRO, 2000).

De acordo com informações divulgadas pela ANM em fevereiro de 2019 (Figura 1), existem 769 barragens cadastradas no Brasil, das quais 55,3% estariam inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), sendo 51,5% destas na PNSB com dano associado alto. A classificação relativa ao dano potencial associado é feita com base no volume total do reservatório, potencial de perdas de vidas humanas e impactos socioeconômicos, de acordo com COBA S.A. (2014).

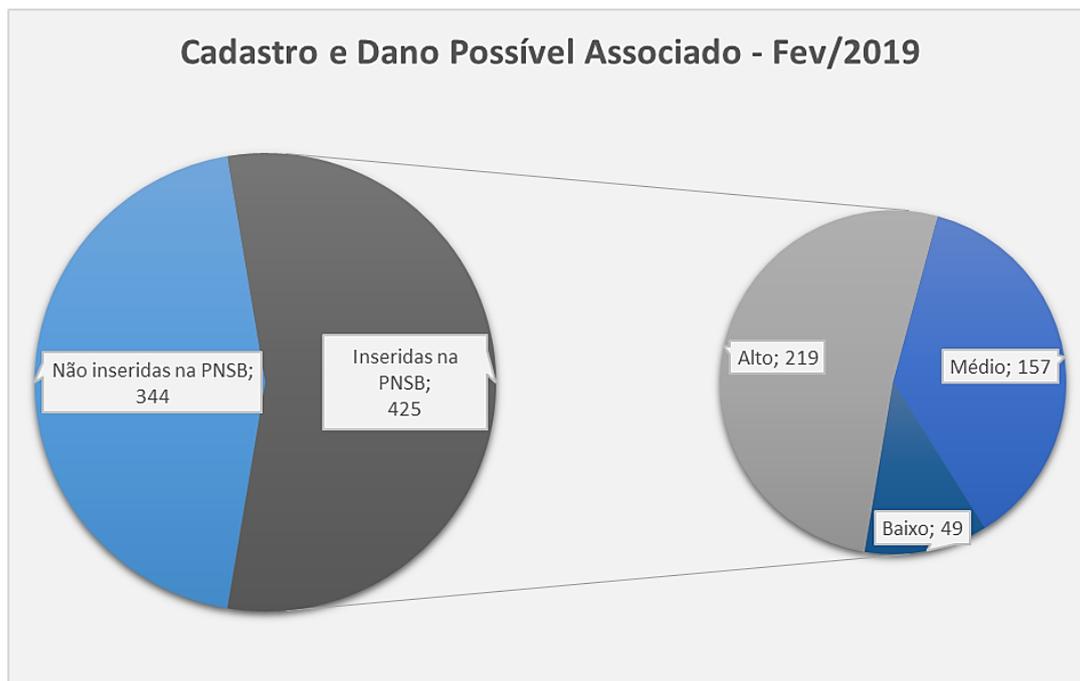


Figura 1: Situação de barragens no Brasil e danos associados.

Fonte: ANM, 2019.

A ANM, em fevereiro de 2019, apresentou a classificação das barragens de mineração brasileiras cadastradas. Neste documento, a agência determina que para uma barragem ser inserida na PNSB, ela se enquadre em algum dos seguintes critérios: (1) altura maior ou igual a 15m; (2) volume maior ou igual a 3 milhões m³; (3) resíduo perigoso; (4) dano potencial associado médio ou alto.

Ainda com relação às barragens inseridas na PNSB, a ANM fornece dados deste mesmo período sobre as classes destas barragens, relacionando a categoria de risco e dano potencial associado, mostrados na Figura 2. As classificações das barragens são feitas conforme descrito na Tabela 1.

Com base na Figura 2 nota-se que grande parte das barragens brasileiras estão localizadas na região Sudeste, em que as classes predominantes são B e C, cujos danos potenciais associados são baixos ou médios e as categorias de risco de baixas a altas.



Figura 2: Relação de barragens inseridas na PNSB e suas respectivas classificações.

Fonte: ANM, 2019.

Tabela 1: Classificação de barragens segundo a ANM.

Classe da barragem		Dano potencial associado		
		Alto	Médio	Baixo
Categoria de risco	Alta	A	B	C
	Média	A	C	D
	Baixa	A	C	E

Fonte: adaptado de COBA S.A. (2014).

Bates (2002) menciona ainda que os rejeitos geralmente encontrados no Brasil podem ser divididos nas seguintes categorias: (1) areia, areia natural e silte; (2) lama ou mica; (3) argila; (4) pedras e seixos; (5) solos de decapeamento e turfa.

O recomendado é que não haja mais de uma categoria em uma mesma barragem, pois isso corresponderia em diferentes granulometrias e comportamentos em uma mesma barragem, podendo gerar planos de falha,

infiltrações e rompimentos. As barragens são consideradas ativas quando há recebimento e/ou descarregamento de líquidos e sólidos e inativas quando não estão mais em uso.

Soares (2010) destaca que a disposição adequada e controlada de rejeitos pode gerar aumentos nos custos de produção. No entanto é necessário realizar caracterização e controle de compactação dos materiais utilizados na construção de barragens, bem como dos materiais usados no alteamento das mesmas, evitando porcentagens elevadas de água, que podem causar liquefação.

Soares (2010) ainda menciona que a estabilidade de uma barragem está diretamente relacionada com as características geotécnicas dos rejeitos ali depositados, a depender da granulometria, densidade *in situ*, índice de vazios, adensamento, compressibilidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento.

Machado (2018) destaca que a deposição de rejeitos pode resultar em impactos ambientais, visuais e, ainda, gerar situações de risco, além de apresentar custos elevados de manutenção. Barragens demandam monitoramento constante para acompanhamento de suas características e modificações de projetos. Portanto, na elaboração de tais projetos deve-se considerar os custos envolvidos, levando em conta que os mesmos devem ser feitos analisando todas as características dos materiais, dinâmica construtiva, conjunto de operações da mina e características do meio físico (SOARES, 2010).

Rubio, Oliveira e Silva (2010) apontaram que o tratamento eficiente dos efluentes gerados, assim como a reciclagem e reaproveitamento, são essenciais para indústrias que buscam a aceitação de seus produtos no mercado internacional.

Por isso surge o aproveitamento de rejeitos, que, segundo Menezes *et al* (2009), tem por objetivo a transformação destes em materiais aproveitáveis, buscando reintroduzi-los no ciclo produtivo, resultando na redução de custos, consumo de matérias-primas e gastos em outros setores. Relata-se ainda que o aproveitamento de resíduos pode trazer benefícios ambientais e também

vantagens econômicas para as indústrias. O principal setor a ser aplicado seria a construção civil, por se tratar de uma área de grande consumo de recursos naturais (MACHADO, 2018).

Pesquisas envolvendo a reciclagem de resíduos e rejeitos se intensifica devido à preocupações ambientais das mineradoras e toda a sociedade, até porque o rompimento de barragens resulta em graves danos socioambientais (BATES, 2002).

Sendo assim, a aplicação de rejeitos na construção civil pode ser muito útil na redução do volume estocado e na minimização de impactos ambientais (FERNANDES *et al*, 2004). Os estudos sobre a reutilização de resíduos foram intensificados na busca de alternativas para minimizar seu descarte na natureza e evitar o desperdício desses recursos minerais não renováveis (BARROS, 2013).

Na Tabela 2 são citados alguns estudos realizados sobre utilização de rejeitos, contendo o rejeito utilizado e a destinação aplicada, segundo cada autor. Nota-se a grande variedade na aplicabilidade obtida para o minério de ferro, material foco desse trabalho.

Os rejeitos de minério de ferro são boas opções para substituição de parte de insumos utilizados na produção de blocos de concreto. Quando apresentam granulometria mais fina, recomenda-se a produção de cerâmicas, pelo fato das argilas usualmente utilizadas apresentarem em sua constituição óxidos de ferro, alumina e sílica. É essencial se atentar ao tamanho das partículas, visto que interferem diretamente nas características do produto final (SILVA, 2014).

Silva *et al* (2017) faz uma revisão bibliográfica, analisando estudos já realizados sobre reutilização de rejeitos da mineração. Neste artigo é apresentado que 42% dos trabalhos analisados aplicam o rejeito na fabricação de cerâmica vermelha, seguido de concreto (25%), argamassas (17%), filtro de barragens (8%) e agricultura (8%).

Tabela 2: Relação de trabalhos de reutilização de rejeitos e suas possíveis aplicações.

Autor / Ano	Rejeito	Aplicação
Fernandes et al, 2004	Minério de Ferro	Pavimentação
Amaral Filho, 2009	Carvão	Energia e comércio de pirita
Chaves, 2009	Minério de Ferro	Cerâmicas
Tolentino, 2010	Minério de Ferro	Vidro, esmaltes cerâmicos e cerâmicas
Nociti, 2011	Minério de Ferro	Cerâmica vermelha
Barros, 2013	Esmeralda	Refratário isolante
Santos et al, 2013	Ardósia	Concreto
Machado et al, 2014	Calcário	Correção de acidez do solo
Silva, 2014	Minério de Ferro	<i>Pavers</i> e cerâmica
Silveira, 2015	Minério de Ferro	Pré-moldados de concreto
Cota, 2017	Minério de Ferro e Manganês	Cerâmica vermelha
Silva, 2017	Minério de Ferro	Concreto asfáltico
Assis, Queiroga e Mendes, 2018	Minério de Ferro	Tijolos maciços
Azevedo e Vital, 2018	Caulim	Tinta ecológica
Machado, 2018	Minério de Ferro	Blocos monolíticos

2.2. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Devido às preocupações ambientais com relação a barragens, estudos para aproveitamento de rejeitos da mineração vêm se intensificando, seja para o seu reprocessamento ou para novas aplicações, em outras áreas. Por conta disso, cresce também o investimento em caracterização dos mesmos, para maior conhecimento de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas e melhor determinação de suas aplicações (REIS, 2005).

A caracterização mineralógica de minérios é feita com intuito de conhecer melhor determinado bem mineral. As técnicas aplicadas na caracterização mineral dependem do minério a ser analisado, objetivos e abrangência dos estudos, tempo e recursos financeiros disponíveis. Inicialmente é realizado o fracionamento da amostra, a fim de facilitar a identificação mineral, “melhorar a quantificação das fases e estabelecer certas propriedades físicas dos minerais” (NEUMANN, SCHNEIDER e NETO, 2010, p. 85), com cuidado para não perder a representatividade da mesma.

As amostras precisam passar por processos de homogeneização e quarteramento, para obtenção de alíquotas para os ensaios posteriores. O material passa então por uma etapa de classificação, para análise granulométrica da amostra em questão, e fracionamento. O fracionamento pode ser feito por meio de líquidos densos, mesa oscilatória ou equipamentos de separação magnética (NEUMANN, SCHNEIDER e NETO, 2010).

Neumann, Schneider e Neto (2010) destacam ainda que as etapas que sucedem o fracionamento são: (1) identificação de fases a serem aplicadas; (2) quantificação mineral; (3) determinação do grau de liberação da amostra. A Figura 3 ilustra um fluxograma de caracterização mineral.

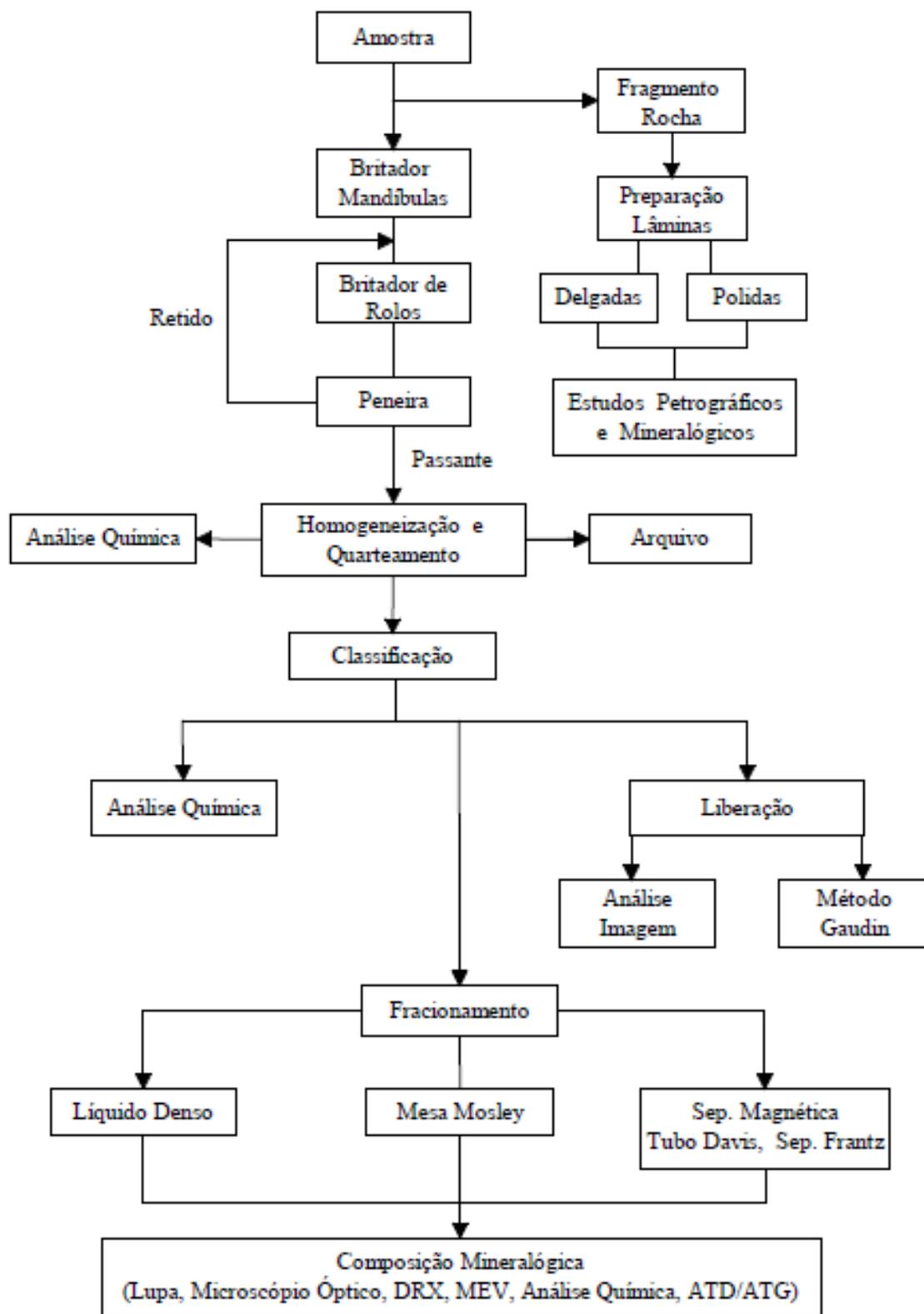


Figura 3: Fluxograma das etapas de caracterização mineral.

FONTE: Neumann, Schneider e Neto (2010).

Para Mantilla (2013), o grau de liberação das partículas é baseado na relação entre os minerais de interesse e ganga que se apresentam livres. É possível fazer uma correlação entre a fragmentação e a liberação mineral, em que quanto maior for a fragmentação da partícula, menor será a associação entre os minerais de interesse e ganga, portanto maior a liberação.

A Figura 4 exemplifica a determinação do grau de liberação mineral. Observa-se partículas com diferentes graus de liberação, no qual a cor branca representa a ganga e a preta o mineral de interesse.

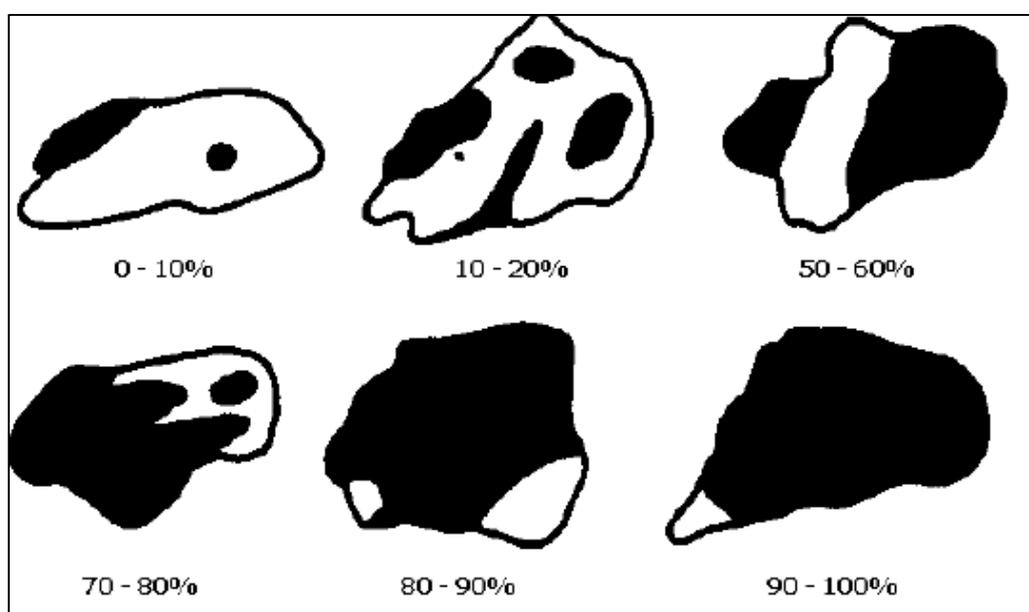


Figura 4: Grau de liberação de partículas minerais.

Fonte: Petruk, 1988 apud Neumann, Scheneider e Neto, 2010.

O peneiramento é um método utilizado para determinação do tamanho de partículas, sendo o mais utilizado devido ao baixo custo quando comparado aos demais. Outros métodos utilizados para obtenção da granulometria são: microscopias óptica e eletrônica e classificação em meio fluido (COSTA, 2014; OLIVEIRA, SILVA e ALVES, 2018).

Porphírio, Barbosa e Bertolino (2010) citam que para a determinação da composição química mineral, pode-se aplicar métodos como: gravimetria, volumetria, colorimetria, além de Espectrografia Óptica de Emissão (EOE),

Fluorescência de Raios X (FRX), Espectrofotometria de Absorção Atômica (EAA) e Espectrometria de Plasma (EP). Além desses, pode-se usar também as técnicas de luz ultravioleta, radiografia e ataques químicos rápidos, que podem auxiliar na identificação mineral.

Já para a análise da composição mineralógica, alguns dos métodos utilizados são: Difractometria de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com unidade de análises por Energia Dispersiva (EDS) e Microsonda Eletrônica (ME), conforme também mencionado por Porphírio, Barbosa e Bertolino (2010).

Neumann, Schneider e Neto (2010) explicam que o DRX é aplicado apenas para materiais cristalinos, não amorfos, visto que é um método que se baseia na interação de ondas na frequência de raios X com os planos de repetição sistemática do retículo cristalino. O resultado é apresentado em forma de gráficos, denominados espectros de difração de raios X, por meio dos quais é possível fazer comparações com espectros já conhecidos e, então, determinar a composição mineral da amostra analisada.

Já “o funcionamento do MEV é baseado na interação do feixe com a superfície da amostra” (NUEMANN, SCHNEIDER e NETO, 2010, p. 100). Este método fornece então imagens em escalas de cinza proporcionais aos sinais gerados pela interação do feixe com a superfície da amostra. Portanto, o MEV é muito utilizado na verificação da morfologia mineral. Pode-se, geralmente, assimilar o peso atômico médio com o nível de cinza obtido.

O método de Mineralogia Quantitativa Eletrônica (MQE) é associado ao MEV e proporciona a análise de imagens por feixe de elétrons retroespalhados e espectros de dispersão de energia. O MQE possibilita a observação detalhada de grande número de partículas, sendo capaz de fornecer a composição mineralógica, grau de liberação mineral, tamanho e forma de partículas (CARMO *et al*, 2014; MANTILLA, 2013, ÁVILA, 2018).

2.2.1. MINÉRIO DE FERRO

Na Figura 5 observa-se que, segundo o Anuário Mineral Brasileiro referente ao ano de 2016, elaborado pelo até então Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 77% do valor da produção mineral comercializada brasileira corresponde a metálicos, atingindo 71,9 bilhões de reais. Neste cenário destaca-se o ferro, cuja produção chega a 63,4% dos metais.

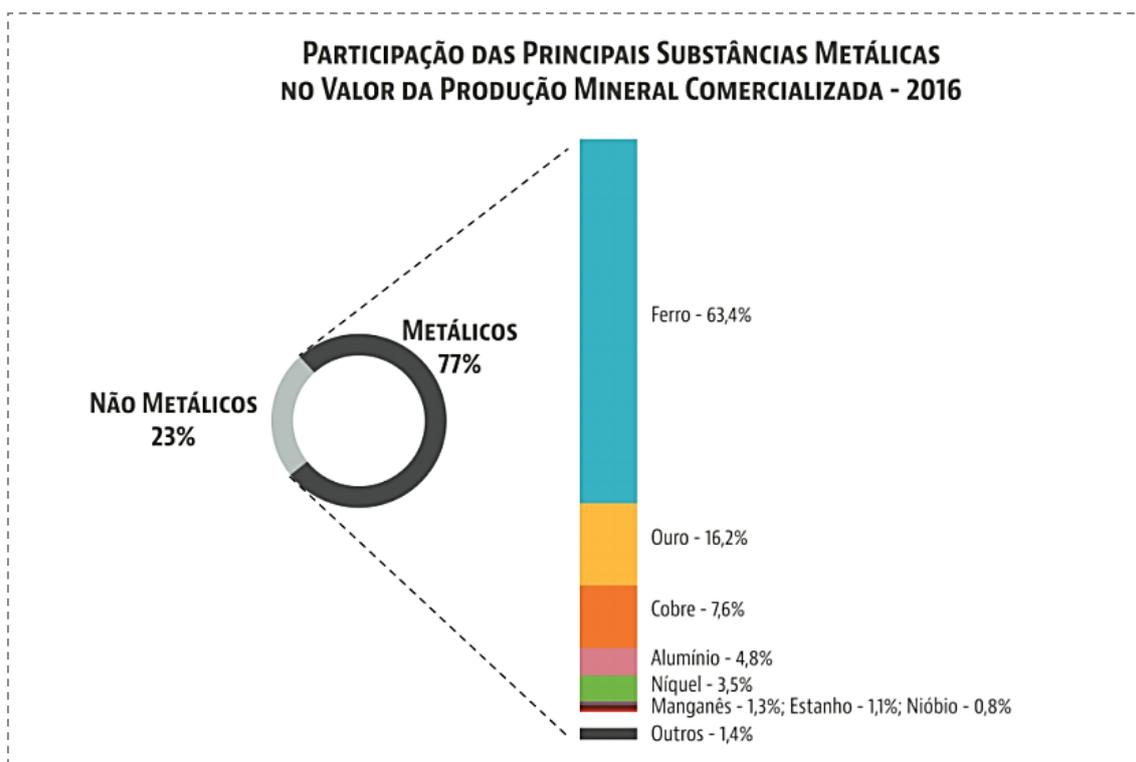


Figura 5: Participação de substâncias metálicas no valor comercializado (2016).

Fonte: DNPM.

O ferro é geralmente encontrado em óxidos, carbonatos e sulfetos, como: hematita, magnetita, limonita, ilmenita, siderita e pirita. No passado o ferro era obtido somente por meio da redução de óxidos com carvão vegetal. (NOCITI, 2011; CHAVES, 2009). A Tabela 3 mostra propriedades importantes de alguns minerais de ferro, segundo Ávila (2018).

Tabela 3: Propriedades dos principais minerais de ferro das classes óxidos, carbonatos e sulfetos.

Classe	Mineral	Teor de Fe	Densidade (g/cm³)
Óxidos	Magnetita	72,4 %	5,18
	Hematita	69,9 %	5,26
	Goethita	62,8 %	4,27
Carbonato	Siderita	48,2 %	3,87
Sulfetos	Pirita	46,5 %	5,01
	Pirrotita	63,6 %	3,95

FONTE: adaptado de Ávila (2018).

Dauce (2017) apresenta características que diferem alguns óxidos de ferro, sendo eles goethita, hematita e magnetita, com relação a cor do traço e magnetismo. Tais informações estão contidas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades importantes de óxidos de ferro (Goethita, Hematita e Magnetita).

Propriedade	Goethita	Hematita	Magnetita
Cor do traço	Marron amarelado	Vermelho	Preto
Magnetismo	Antiferromagnética	Paramagnética, fracamente ferromagnética ou antiferromagnética	Ferrimagnética

FONTE: adaptado de Dauce, 2017.

A comercialização do minério de ferro depende das características obtidas no tratamento de minérios, de acordo com granulometria, teor e impurezas associadas. No Quadrilátero Ferrífero os principais minerais de ferro em rochas itabiríticas são hematita, magnetita e goethita, enquanto os principais minerais de ganga são quartzo, caulinita e gibbsita (SILVA, 2014; ÁVILA, 2018).

A norma NRM 18 define o beneficiamento de minérios como um tratamento que tem por objetivo a preparação granulométrica, concentração ou purificação mineral, utilizando métodos físicos ou químicos, sem que haja alteração da constituição química dos minerais.

De acordo com Luz e Lins (2010) as etapas no tratamento de minério são basicamente: (1) cominuição, por meio de britagem e moagem; (2) classificação granulométrica, utilizando peneiramento e cicloclassificação; (3) concentração gravítica e separação magnética, eletrostática e flotação, por meio de células ou colunas; (4) desaguamento, através de filtragem e espessamento; (5) secagem; (6) disposição dos rejeitos em barragens.

O minério de ferro é majoritariamente usado na indústria siderúrgica, mas uma pequena parte é utilizada “como carga na indústria ferro-liga, cimento e eventualmente na construção de estradas” (CHAVES, 2009, p. 44). Os produtos de minério de ferro são aplicados na produção de aço, sendo eles: granulado, *sínter feed* e *pellet feed* (DAUCE, 2017).

Os granulados são aqueles cuja granulometria fica entre 200 mm e 12,5 mm. O *sínter feed*, por sua vez, é dito como o produto fino da siderurgia, cuja granulometria se encontra entre 12,5 mm e 0,15 mm, sendo usualmente destinado à sinterização. Por fim, o *pellet feed* é aquele abaixo de 0,15 mm, portanto chamado de superfino (SALES, 2012; TAKEHARA, 2004).

2.3. MATERIAIS CERÂMICOS

A indústria cerâmica é uma das mais antigas do mundo, devido à facilidade de fabricação e abundância de matéria-prima. Historicamente no Brasil, especificamente em meados do século XIX na cidade de São Paulo, a produção de cerâmicas era uma atividade industrial em pequenas olarias, que utilizava processos manuais, sendo a primeira fábrica fundada ali em 1893, por franceses (SILVA, 2014; NOCITI, 2011).

Bauer (2013) destaca que os materiais cerâmicos oferecem uma grande variedade de produtos e aplicações, sendo eles para alvenaria, cobertura,

canalizações, revestimentos, acabamentos, utilitários e usos especiais. Alguns exemplos de peças cerâmicas são tijolos, tubos, isoladores, blocos cerâmicos, telhas, ladrilhos e louças. Importante salientar que os produtos cerâmicos precisam seguir normas e especificações de fabricação, determinados pelas normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

2.3.1. DEFINIÇÕES

Segundo Nociti (2011), a cerâmica abrange produtos derivados de uma composição de argila e outras substâncias minerais, sendo elas cozidas a fim de obter solidez e inalterabilidade, podendo ser incorporadas aos produtos em sua forma natural ou após passarem por processamento. Bauer (2013), por sua vez, cita que a cerâmica é obtida por processo de moldagem, secagem e cozimento de argilas ou misturas.

As argilas são materiais terrosos naturais compostos por argilominerais que, quando misturados com água, apresentam plasticidade elevada, sendo os argilominerais constituintes silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Elas podem ser caracterizadas segundo sua composição, de acordo com os argilominerais e minerais predominantes. Os principais componentes das argilas são então: caulinita; óxido de ferro; sílica; alumina; álcalis; cálcio; compostos solúveis em água; matéria orgânica e água (BAUER, 2013; NOCITI, 2011; CHAVES, 2009).

De acordo com Oliveira (2000) citado por Tolentino (2010), os tipos mais comuns de argila são: natural, refratária, de bola, para grês, vermelha e caulim. A argila vermelha é caracterizada por apresentar elevado teor de ferro e coloração avermelhada, além de boa plasticidade.

2.3.2. PROPRIEDADES

Com relação às cerâmicas, algumas características podem ser destacadas, sendo elas: isolantes elétricos e térmicos, relativa resistência à

elevadas temperaturas e ambientes abrasivos, duras e quebradiças (MACHADO, 2018).

Segundo Bauer (2013), as argilas molhadas, por exemplo, apresentam-se plásticas, porque podem ser continuamente deformadas, sendo a quantidade de água necessária para atingir o ponto de maior plasticidade variante entre 10% e 50%, dependendo do tipo de argila utilizada. Importante salientar que a composição e forma dos grãos da argila influenciam diretamente nas propriedades da mesma.

Bauer (2013) destaca que tratando-se de argilas, é importante observar a plasticidade, a retração e o efeito do calor. No entanto, nas cerâmicas, as propriedades mais importantes são com relação ao peso, resistência, absorção de água e duração. Estas propriedades dependem da constituição, do cozimento e processo de moldagem utilizado.

Nociti (2011) mostra que a retração ocorre devido aos espaços vazios que surgem na peça após a secagem, sendo então proporcional à umidade e dependente da composição. A retração é prejudicial, pois pode resultar em deformações na peça, por isso a importância de controlar esse efeito. Por este motivo, normas nacionais e internacionais determinam a uniformidade dimensional como um requisito a ser seguido na fabricação de cerâmicos (SILVA, 2014).

Quando submetida ao calor, a argila inicialmente passa por alterações físicas, perdendo a água de capilaridade e amassamento. Em seguida, inicia-se as alterações químicas, onde ocorrem a desidratação química, o endurecimento, a queima de matéria orgânica, a oxidação e a vitrificação. A vitrificação é essencial para determinar o tipo de cerâmica que se deseja como produto final, afinal as porcelanas, por exemplo, dependem de grande quantidade de vidro formado nesse processo, enquanto que para os tijolos comuns essa quantidade não é expressiva (BAUER, 2013).

2.3.3. FABRICAÇÃO DE CERÂMICAS

Geralmente a fabricação de cerâmicas envolve seis etapas, sendo elas: extração do barro, preparo da matéria-prima, moldagem, secagem, cozimento e esfriamento. A moldagem é realizada a fim de dar à cerâmica a forma desejada e pode ser realizada de diferentes maneiras, dependendo da quantidade de água utilizada no processo (BAUER, 2013).

Em seguida é realizado o processo de secagem, com o objetivo de evitar fendilhamento e deformações no cozimento. Após a secagem há a etapa de cozimento, considerada a parte mais importante do processo de fabricação de cerâmicas. O cozimento pode ser afetado por diversos fatores, como: temperatura, velocidade de aquecimento e/ou resfriamento, atmosfera ambiente, uniformidade de aquecimento e tipo de forno e combustível utilizados (BAUER, 2013).

Os tijolos maciços cerâmicos, de acordo com Machado (2018), são compostos por argila e matérias-primas inorgânicas e caracterizam-se como um dos principais produtos aplicados à alvenaria. Para sua produção são seguidas as etapas de conformação por extrusão, secagem e queima.

Na Tabela 5 há uma relação entre os produtos fabricados e os tipos de cerâmicas, dependendo da matéria-prima e processos aplicados. Essa tabela pode auxiliar na escolha adequada da argila a ser utilizada, bem como os processos e temperaturas mais recomendados para cada produto a ser fabricado.

Tabela 5: Produtos cerâmicos, matérias-primas e processos utilizados.

CLASSIFICAÇÃO		PRODUTO	Matéria-prima							Processo de conformação		Temperatura de Queima (°C)										
Tipo de cerâmica [†]	GRUPO**/ SETOR		Plástica		Não-plástica					Moagem via úmida	Moagem via seca	Extrusão	Tornearia	Prensagem	Colagem	800	900	1.000	1.100	1.200	>1.200	
			Argila comum	Argila plástica	Caulim	Feldspato (****)	Filito	Talco	Calcário													Quartzo
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica	Blocos, lajes	P								P										
		Vermelha	Telha	P			O					P	P									
			Agregado leve	P							O		P									
	2		Grês sanitário		P	S	P	O		S	O	P										
		Cerâmica	Porcelana Mesa		P	P				P		P	S	S	O							
		Branca	Porcelana Eletr.		P	P				P		P	S	S	O							
			Faiança		P	O	S	S	S	P	S		P			P						
	3	Revestimentos		Pisos rústicos	P	O						O		P								
				Pisos via seca	P								P			P						
				Azulejo		P	P			O	S	S	P			P						
			Piso gresificado	O	P	S	S	P	O		S		P	O	P							
			Grês porcelânico		P	S	P		O		S	O	P			P						
Outras	4		Refratários			O				O	P											
	5		Isolantes			O				O	P											
	6		Especiais							O	P											
	7		Cimento	S					P	S	O	P										
	8		Vidro			S			S	P	P											
P	Processo ou composição principal (> 20%)		S	Processo ou composição secundária (< 10%)						O	Processo ou composição ocasional											

Fonte: MOTTA et al., 2001 citado por CHAVES, 2009.

3. METODOLOGIA

3.1. OBTENÇÃO DE AMOSTRAS

Foram utilizados neste trabalho um solo argiloso concedido por professores do CEFET-MG campus Araxá e um rejeito de concentração de minério de ferro cujas amostras foram coletadas na empresa Pedreira Um Valemix, localizada em Catas Altas-MG. O material constitui o rejeito proveniente de uma separação magnética que foi desaguado por hidrociclone, sendo o *underflow* o material amostrado.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS

Na fase de caracterização, os testes propostos foram: determinação da umidade; obtenção da massa específica por meio de picnometrias manual e a gás; análise mineralógica, utilizando MQE e DRX; distribuição granulométrica; análise química da amostra global, por meio de FRX.

Alguns dos testes (determinação da umidade e massa específica por picnometria manual) foram realizados no CEFET-MG campus Araxá. Para a MQE, a amostra foi encaminhada para a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). As amostras pulverizadas foram enviadas para o CEFET-MG, campus Belo Horizonte, onde os demais testes seriam realizados.

As amostras foram todas encaminhadas, mas devido à falta de disponibilidade dos aparelhos do CEFET-MG, campus Belo Horizonte, os testes de DRX, FRX e picnometria a gás não puderam ser realizados. Desta forma, os testes de fato realizados foram: determinação da umidade; obtenção da massa específica por picnometria manual; MQE, por meio do qual obteve-se associações minerais, composição mineralógica, distribuição granulométrica e distribuição de frequência de tamanho das partículas por fase.

Os dados referentes ao aparelho utilizado na análise de MQE e análise realizada são:

- Modelo: MIRA3 LMH;
- Número de série: MI2201281BR;
- Corrente: 5,3 eV;
- Tamanho do foco: 58,47 nm;
- Versão do *software* TIMA: 1.6.63;
- Quantidade de raios-X por *pixel*: 1000;
- Largura do campo: 1500;
- Espaçamento de *pixel*: 3;
- Número de partículas analisadas: 29.133.

3.3. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

O material foi trabalhado no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG campus Araxá, onde houve preparação das amostras e alguns dos testes foram realizados. Após amostragem, as amostras passaram por pesagem e secagem utilizando estufas e, em seguida, determinação da umidade (%p/p). Para isso, deve-se subtrair a massa seca da massa total inicial, dividir pela massa seca e, então multiplicar por 100, para que a umidade possa ser determinada, segundo a fórmula:

$$Umidade = \left(\frac{Massa\ inicial - Massa\ seca}{Massa\ seca} \right) \times 100$$

Assim, a amostra seca, cuja massa total foi de 65,88 kg, foi submetida a homogeneização (feita com o auxílio de lonas), desaglomeração e quarteamento para separação das alíquotas necessárias nos testes. Para quarteamento da amostra primeiro foi feita uma pilha alongada para retirada da massa total necessária nos testes de caracterização. Em seguida o método de pilha cônica foi aplicado para retirada das amostras de cada teste.

Para alguns testes as amostras precisaram ser pulverizadas a -325# e, nesses casos, foram utilizados gral e pistilo de ágata. Em seguida as amostras passaram pela peneira de 325#, à úmido, para confirmar se haviam chegado à

granulometria desejada. Por fim, o passante e o retido desta peneira foram submetidos à secagem, separadamente. O material passante foi armazenado e o retido novamente submetido a pulverização. Os processos de pulverização e a retirada de retidos da peneira são apresentados na Figura 6.

A Tabela 6 apresenta a relação entre as massas destinadas a cada teste de caracterização, o local de realização dos testes e a forma que cada alíquota foi destinada (pulverizada ou global).



Figura 6: (A) Amostra submetida à pulverização; (B) Retirada de retidos da peneira após pulverização.

Tabela 6: Relação de massas destinadas a cada teste e local de realização.

Teste	Massa (g)	Observação	Local
DRX	52,41	Pulverizada	Belo Horizonte
FRX	52,79	Pulverizada	Belo Horizonte
MQE	414,22	Global	Ouro Preto
Picnometria a gás	62,06	Pulverizada	Belo Horizonte
Picnometria manual	52,00	Global	Araxá

Importante salientar que as amostras de rejeito foram pulverizadas apenas para realização de testes específicos (Tabela 6), tendo em vista especificações técnicas dos mesmos. Na elaboração dos tijolos o rejeito foi utilizado na sua granulometria original.

Por fim, o solo a ser utilizado na elaboração dos tijolos passou pelo processo de desagregação, para eliminação de torrões. O produto final foi o passante na peneira de 35# (0,5 mm), cuja massa total foi de aproximadamente 2,5 kg. O solo em questão não foi caracterizado.

3.4. ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As etapas a seguir foram realizadas no Laboratório de Edificações do CEFET-MG, campus Araxá. Inicialmente foram feitos testes com o solo, que constituem na incorporação de água aos sólidos até atingir a plasticidade necessária, buscando a umidade ideal do processo.

Além disso, por meio da fabricação de alguns tijolos, foi feita a determinação da forma adequada de utilização da fôrma e da prensa usadas para fabricação dos corpos de prova. O mesmo processo foi realizado com as misturas de solo e rejeito.

A Figura 7 e a Figura 8 mostram a fôrma utilizada na fabricação dos tijolos, composta por base, paredes, tampa e placa para delimitação da altura. A fôrma foi encomendada na empresa MAX SOLDAS, cujas dimensões externas (comprimento x largura x altura), em cm, são:

- Base: 11,5 x 7,5 x 1,8;
- Paredes: 8,7 x 4,7 x 4,0;
- Tampa: 8,5 x 4,5 x 4,5.

O chanfro da tampa foi feito a 1 cm das extremidades e apresenta 0,5 cm de altura.



Figura 7: Componentes da fôrma utilizada para fabricação dos tijolos.



Figura 8: Fôrma montada utilizada na fabricação dos tijolos.

Os corpos de prova foram fabricados, com as diferentes porcentagens de substituição, sendo elas 0%, 5% e 15%, em volume. Para a fabricação, inicialmente o sólido (apenas solo ou a mistura de solo e rejeito) era umidificado até obter a textura de uma farinha úmida.

A umidade de cada porção foi ajustada até chegar ao ponto desejado e então a mistura era pesada e colocada na fôrma, já untada com óleo de mamona. A umidade da mistura utilizada ficou em torno de 28% a 31% e as massas utilizadas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Quantidades de materiais utilizados na fabricação dos tijolos.

	0%	5%	15%
Solo (g)	585	540	540
Rejeito (g)	-	58,86	197,34
Água (g)	181,41	199,2	208,34
Umidade (%)	31	30	28

Após esse processo, a fôrma foi submetida à uma prensa até aproximadamente 4 kN, independente da porcentagem de substituição, onde permanecia por alguns segundos para a compressão da pasta e consequente retirada de excesso de espaços vazios e água. Por fim, os tijolos eram desenformados e colocados em placas de vidro próximos à uma janela para secagem.

Posteriormente, os tijolos passaram pelo processo de secagem natural, feita mantendo os tijolos próximos à uma janela por um período inicial de 5 dias, data em que a queima foi iniciada. A Figura 9 ilustra como o molde foi submetido à prensa (A) e como o tijolo foi retirado da fôrma posteriormente (B).

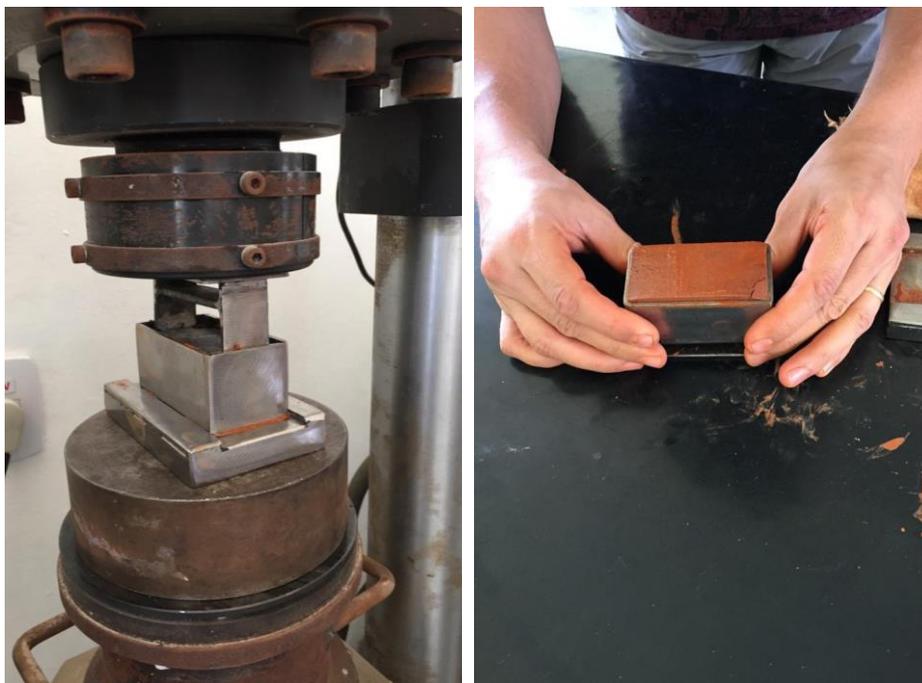


Figura 9: Testes realizados para a fabricação dos tijolos, com auxílio do professor Alexander. (A) Prensagem do molde; (B) Retirada do tijolo do molde.

Para a queima em mufla, foram feitas 4 remessas com 4 ou 5 tijolos, conforme capacidade máxima da mufla. As temperaturas utilizadas foram de 850°C ou 1000°C.

O equipamento foi programado para uma taxa de aquecimento adequado para que a temperatura desejada fosse atingida após 2 horas. Para tal, a curva de aquecimento da mufla foi analisada e as velocidades determinadas, sendo elas de 8,3°C/min para a temperatura de 1000°C e 7,1°C/min para 850°C. A mufla ainda foi programada para manter a temperatura desejada por 2 horas.

A fim de evitar o choque térmico e consequentes rachaduras nos tijolos, era necessário esperar um tempo para o resfriamento da mufla. Por esse motivo a mufla foi aberta quando atingiu uma temperatura aproximada de 150°C e os tijolos retirados quando a temperatura atingiu cerca de 60°C.

3.5. TESTES EM LABORATÓRIO

Foram realizadas análises qualitativas, como: facilidade de desmoldar, aparência, retração, perda ao fogo, dureza e tempo de absorção de água. O objetivo foi encontrar a melhor condição, tanto pela avaliação da porcentagem de substituição, da argila por rejeito, como também pela temperatura utilizada na queima.

Inicialmente foram realizados testes para avaliação dos aspectos gerais dos tijolos, como: coloração, aparência e facilidade de desenformar.

Para a avaliação da retração (Figura 10), o comprimento dos tijolos foi medido com o auxílio de um paquímetro digital, antes e depois da queima. Para o cálculo da retração aplicou-se a seguinte fórmula:

$$RLQ = \frac{C_s C_q}{C_q} \times 100$$

A retração é obtida em porcentagem, sendo:

- *RLQ*: retração linear da queima (%);

- C_s : Comprimento após secagem (mm);
- C_q : Comprimento após queima (mm).

Para o cálculo de perda mássica ao fogo, os tijolos foram submetidos a pesagem em uma balança de precisão, antes e depois da queima. O resultado foi obtido pela fórmula:

$$PF = \frac{M_s M_q}{M_q} \times 100$$

A perda mássica ao fogo é obtida em porcentagem, sendo:

- PF : retração linear da queima (%);
- M_s : Massa após secagem (mm);
- M_q : Massa após queima (mm).

A dureza foi analisada pela facilidade de riscar ou não o tijolo. A avaliação do risco se deu por sua classificação – uma escala de 1 a 5, sendo 1 a condição mais fácil de riscar e 5 mais difícil. Os tijolos foram riscados na parte de baixo com o auxílio de um clipe de metal.

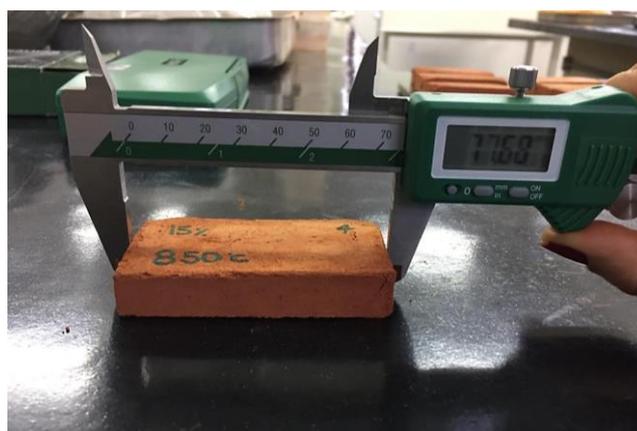


Figura 10: Utilização do paquímetro para medição do comprimento e cálculo de retração.

Para o teste de tempo médio de absorção de água (Figura 11) foi utilizado um conta-gotas com água e um cronômetro. Na parte de cima de cada tijolo foram colocadas 5 gotas de água e o tempo necessário para absorção em cada caso foi cronometrado.

O início da contagem do tempo foi sempre após a 5ª gota de água ser adicionada à superfície do tijolo e o fim da contagem quando a água foi totalmente absorvida.

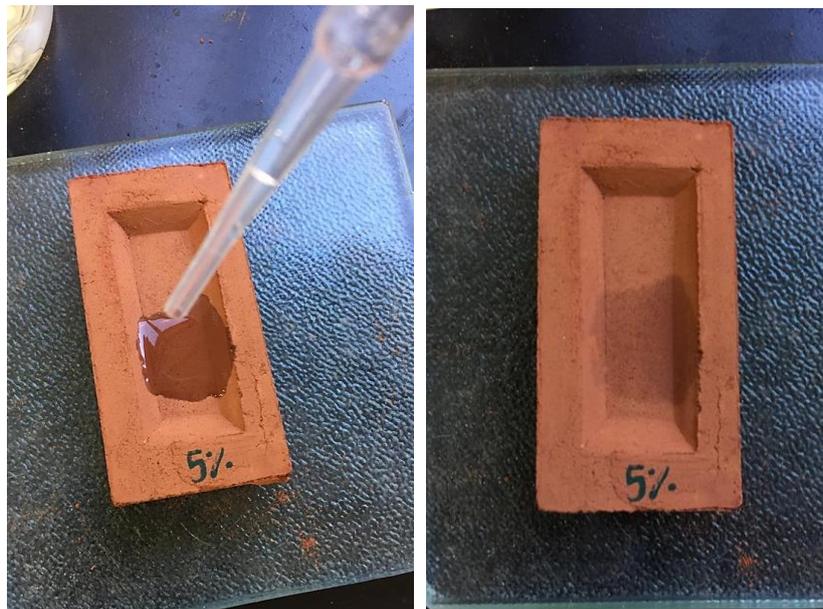


Figura 11: Processo para obtenção do tempo de absorção: (A) Água sendo aplicada ao tijolo; (B) Água totalmente absorvida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a obtenção das amostras de rejeito, as mesmas foram submetidas ao processo de secagem em estufa por 24 horas, sendo a massa total úmida igual a 79,40 kg e a massa após secagem 65,88 kg. Sendo assim, foi possível determinar a umidade base seca da amostra global, aproximadamente 20,53%.

A fim de obter a densidade (d_s) média da amostra foi realizada picnometria manual. A Tabela 8 mostra os resultados obtidos nesse teste. Observa-se que a densidade média encontrada foi de 2,73 g/cm³. Com o intuito de avaliar a confiabilidade dos resultados foi realizado o cálculo do desvio padrão, sendo o valor encontrado (0,02) muito satisfatório.

Tabela 8: Resultados obtidos pela picnometria manual.

Amostra	d_s (g/cm³)	d_s média (g/cm³)	Desvio padrão
Rejeito	2,70	2,73	0,02
	2,75		
	2,74		

Segundo Silva (2014), que também estudou rejeitos de separação magnética de minério de ferro para aplicação na fabricação de *paver* e cerâmica, a densidade desses rejeitos é em torno de 2,757 g/cm³, mostrando-se semelhante à média de densidade obtida neste trabalho, de 2,73 g/cm³.

4.1.1. RESULTADOS MQE

O MQE possibilitou a determinação da composição mineralógica do rejeito estudado, por análise de 29.133 partículas e o resultado é apresentado na Figura 12.

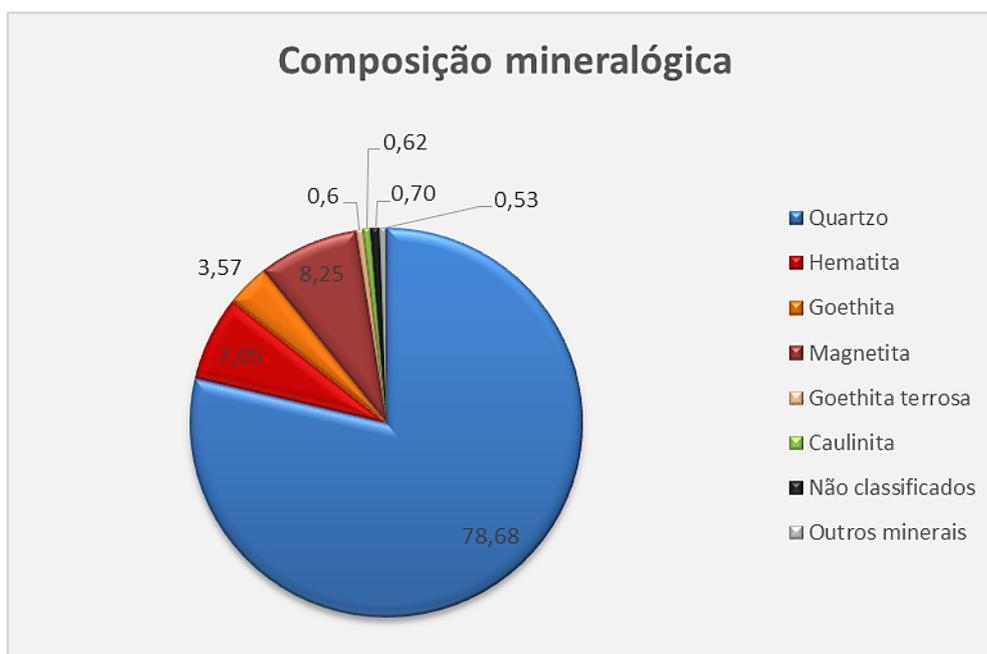


Figura 12: Composição mineralógica do rejeito obtido por MQE.

Nota-se que quase 80% do material é composto por quartzo, enquanto os minerais ferrosos (hematita, goethita e magnetita) correspondem a pouco mais de 19%. Por meio das imagens geradas na análise é possível comprovar a composição mineralógica obtida, conforme ilustrado na Figura 13 e Figura 14.

A Figura 13 apresenta a imagem panorâmica da amostra. Claramente há a predominância de quartzo (coloração azul). Posteriormente, nota-se pontos em vermelho escuro, vermelho e laranja, referindo-se a magnetita, hematita e goethita, respectivamente. Na legenda são mencionados outros minerais que compõem a amostra, que também podem ser observados na Figura 13, porém em quantidades consideravelmente menores, conforme confirmado pela Figura 12 e também encontrados nas imagens da Figura 14.

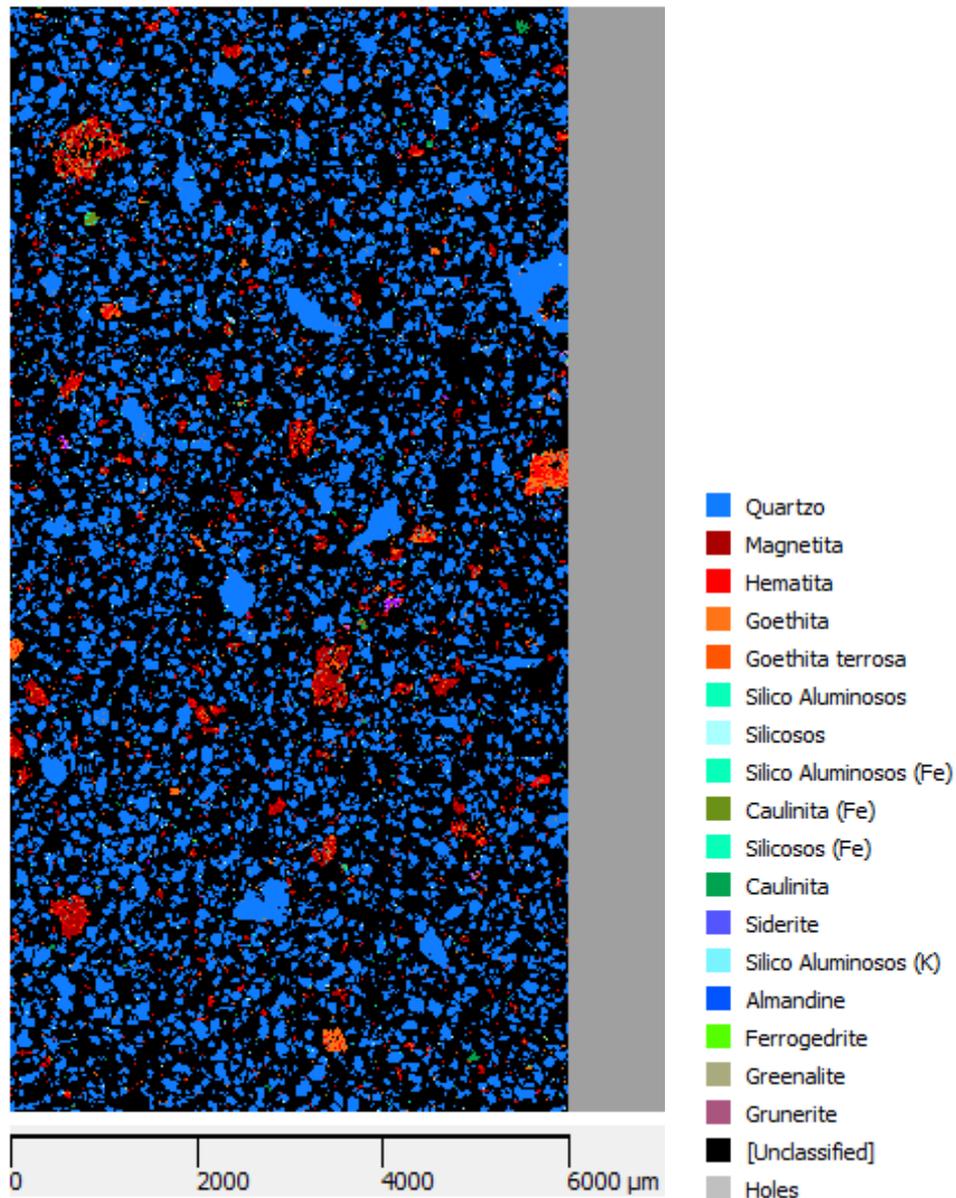


Figura 13: Mapa de fases da amostra obtida por MQE.

A Figura 14, por sua vez, apresenta regiões específicas da imagem panorâmica, possibilitando maior detalhamento e análises mais completas. Em (A) há partículas associadas de minerais ferrosos, em especial uma partícula no canto inferior direito. Em (B) há uma partícula laranja ao centro, tratando-se de uma partícula predominantemente composta por goethita. Nota-se que as partículas de minerais ferrosos encontram-se associadas.

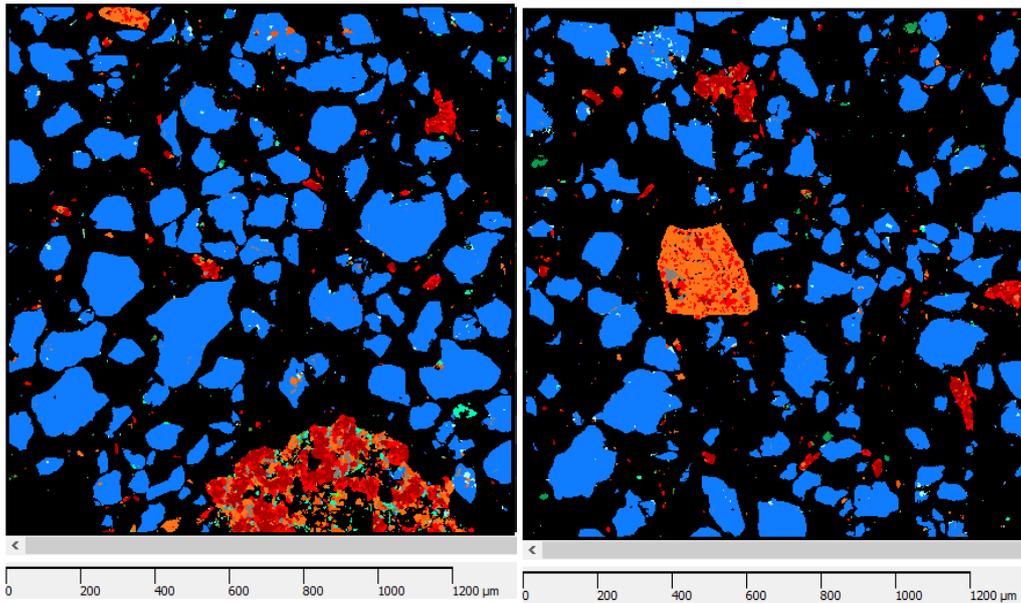


Figura 14: Campos de análises obtidos por MQE: (A) Região 1 analisada; (B) Região 2 analisada.

Por meio da Figura 14 é perceptível que as partículas da amostra analisada encontram-se desaglomeradas, o que mostra a confiabilidade da distribuição granulométrica obtida por MQE.

Além da composição mineralógica da amostra, foi obtida também a distribuição granulométrica da mesma, apresentada na Tabela 9 e Figura 15. Nota-se a predominância de partículas de granulometria entre 53 e 149 μm , representando 59% do total. Ainda, observa-se que aproximadamente 76% das partículas apresentam-se menores que 149 μm . O maior tamanho obtido foi de 592 μm .

Tabela 9: Distribuição granulométrica obtida por MQE.

Distribuição granulométrica			
Tamanho de partículas	Tamanho Médio [μm]	Porcentagem	Passante acumulado
$\geq 3,0 < 10$	5,5	2,00	2,00
$\geq 10 < 17$	13	1,73	3,73
$\geq 17 < 23$	20	1,29	5,02
$\geq 23 < 37$	29	4,18	9,20
$\geq 37 < 48$	42	5,02	14,22
$\geq 48 < 53$	50	2,68	16,90
$\geq 53 < 74$	63	16,22	33,12
$\geq 74 < 105$	88	24,09	57,21
$\geq 105 < 149$	125	18,73	75,94
$\geq 149 < 177$	162	6,49	82,43
$\geq 177 < 210$	193	4,40	86,83
$\geq 210 < 250$	229	1,79	88,62
$\geq 250 < 296$	272	2,29	90,91
$\geq 296 < 354$	324	0,89	91,80
$\geq 354 < 419$	385	2,00	93,80
$\geq 419 < 500$	458	5,43	99,23
$\geq 500 < 592$	544	0,77	100,00

A maior inclinação da reta no gráfico (Figura 15) coincide com a predominância da granulometria obtida da amostra, sendo da faixa de 53 a 149 μm .

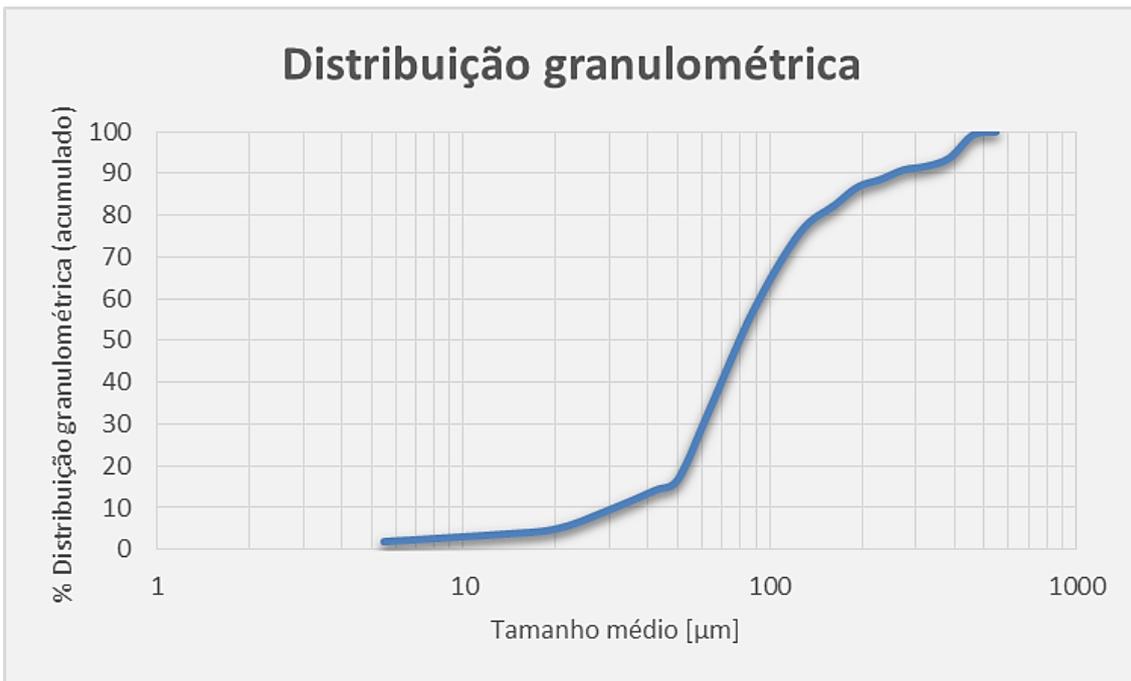


Figura 15: Gráfico de distribuição granulométrica acumulada.

Outro resultado obtido foi o de distribuição granulométrica de acordo com a fase, sendo considerados os minerais predominantes na amostra. Este resultado foi chamado de “distribuição de frequência de tamanho das partículas por fase”, sendo apresentado na Tabela 10 e Figura 16.

Com base na Tabela 10 e Figura 16 é possível afirmar que as partículas de quartzo possuem tamanho entre 53 e 149 μm , o que já era de se esperar, visto que praticamente 80% do material é composto por quartzo. Ainda com relação ao quartzo é possível determinar que 87% dele apresenta tamanho abaixo de 177 μm .

Com relação aos minerais ferrosos, abaixo de 177 μm tem-se 63% da hematita, 56% da goethita e 60% da magnetita. Esses resultados mostram que, de forma geral, as partículas de quartzo apresentam-se mais finas quando comparadas com as partículas de minerais ferrosos.

Com base na Figura 16 fica evidente que as partículas de minerais ferrosos apresentam distribuição granulométrica similar, enquanto as partículas de quartzo mostram-se distintas e mais finas.

Tabela 10: Distribuição granulométrica por mineral constituinte da amostra obtida por MQE.

Distribuição de frequência de tamanho das partículas por fase					
Tamanho de partículas	Tamanho Médio [μm]	Quartzo	Hematita	Goethita	Magnetita
$\geq 3,0 < 10$	5,5	0,31	5,88	9,73	2,15
$\geq 10 < 17$	13	0,52	7,04	6,33	4,06
$\geq 17 < 23$	20	0,64	4,22	3,35	2,70
$\geq 23 < 37$	29	3,37	8,25	4,50	6,58
$\geq 37 < 48$	42	5,15	4,43	3,24	4,73
$\geq 48 < 53$	50	2,92	1,73	1,50	1,86
$\geq 53 < 74$	63	18,65	7,85	5,54	7,81
$\geq 74 < 105$	88	27,95	9,07	8,46	13,15
$\geq 105 < 149$	125	20,90	11,01	8,25	12,55
$\geq 149 < 177$	162	7,13	3,76	4,92	4,49
$\geq 177 < 210$	193	2,92	10,66	8,55	11,55
$\geq 210 < 250$	229	1,59	2,75	1,70	3,10
$\geq 250 < 296$	272	2,04	2,71	8,43	2,36
$\geq 296 < 354$	324	0,37	2,44	2,87	3,32
$\geq 354 < 419$	385	0,58	5,62	4,63	10,93
$\geq 419 < 500$	458	3,98	12,58	17,99	8,66
$\geq 500 < 592$	544	0,99	0,00	0,02	0,00
Total		100	100	100	100

O rejeito, apesar de ser composto predominantemente por quartzo, apresenta coloração bem característica, puxando para o vermelho/laranja. Isso pode ser explicado pela granulometria das fases: pelo fato do quartzo apresentar granulometria mais fina, a olho nu destacam-se as partículas de minerais ferrosos, mais grossas, de coloração avermelhada.

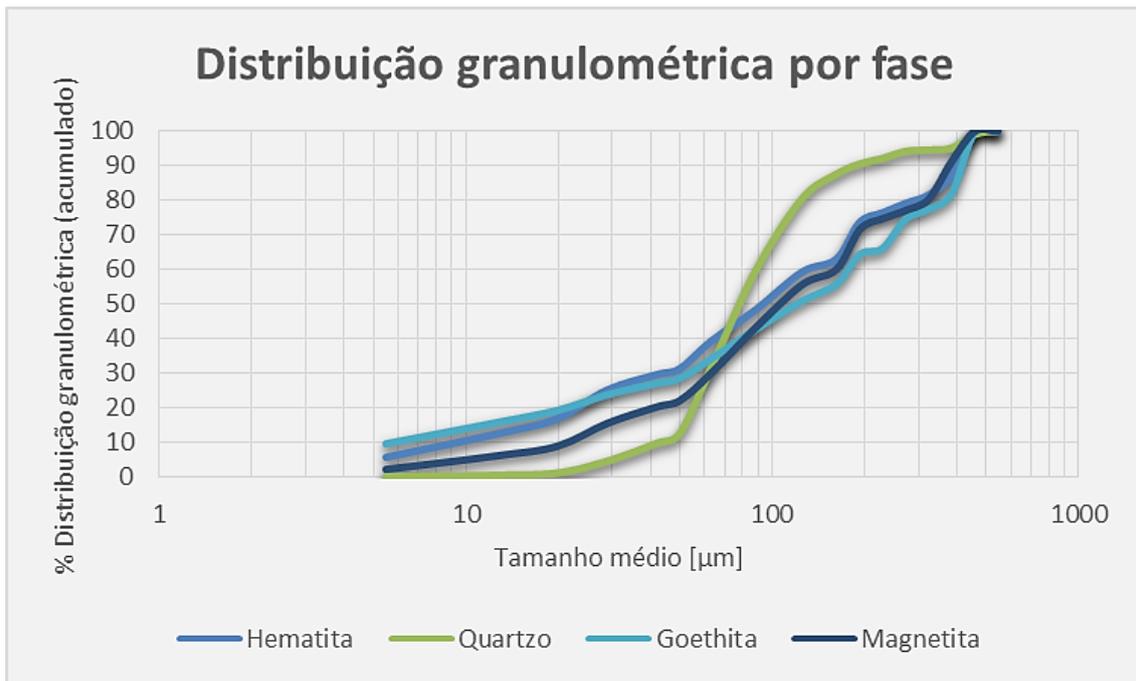


Figura 16: Gráfico de distribuição granulométrica por fase.

Foi obtida também a relação de associação dos minerais, em que é possível observar que os minerais ferrosos apresentam-se predominantemente associados entre si. Em contrapartida, as partículas de quartzo são comumente livres.

4.2. DESEMPENHO DOS TIJOLOS

Os testes propostos foram realizados no CEFET-MG campus Araxá, no Laboratório de Edificações, onde os tijolos foram confeccionados e passaram pelos processos de secagem e queima.

Foram avaliados os aspectos gerais dos tijolos, como: aparência, coloração e facilidade de desmoldar. Outras características analisadas incluem retração, perda ao fogo, dureza e tempo de absorção de água. Esses testes foram realizados a fim de conhecer melhor as características dos tijolos fabricados.

4.2.1. ASPECTOS GERAIS

O primeiro aspecto considerado foi com relação à facilidade de desmoldar os tijolos depois de submetidos à prensa, a depender da variação da porcentagem de substituição utilizando rejeito.

De forma geral os tijolos com 15% de substituição apresentaram maior facilidade. Uma sugestão para trabalho futuro é a avaliação do motivo pelo qual o aumento da substituição facilitou o desmolde.

Na Figura 9 é possível observar como os tijolos eram desmoldados. Nela, há o exemplo de um tijolo fabricado apenas de solo, ou seja, com 0% de substituição de rejeito. Nota-se uma falha comumente observada ao desenformar, no canto do tijolo. Essa falha, por exemplo, não foi frequente nos tijolos utilizando substituição, em especial os de 15%.

Na Figura 17 observa-se que alguns tijolos apresentaram imperfeições, sendo estas mais comuns nos produtos feitos apenas de solo. Os tijolos com 15% de rejeito foram os de melhor aparência.



Figura 17: Tijolos fabricados com 0%, 5% e 15% de substituição, respectivamente (de cima para baixo).

Com relação à coloração, os tijolos de 0% de substituição apresentaram-se um pouco mais escuros, enquanto nos tijolos de 15% a coloração ficou levemente alaranjada, conforme observado também na Figura 17.

Após os processos de secagem e queima, a aparência dos tijolos foi novamente analisada (Figura 18).

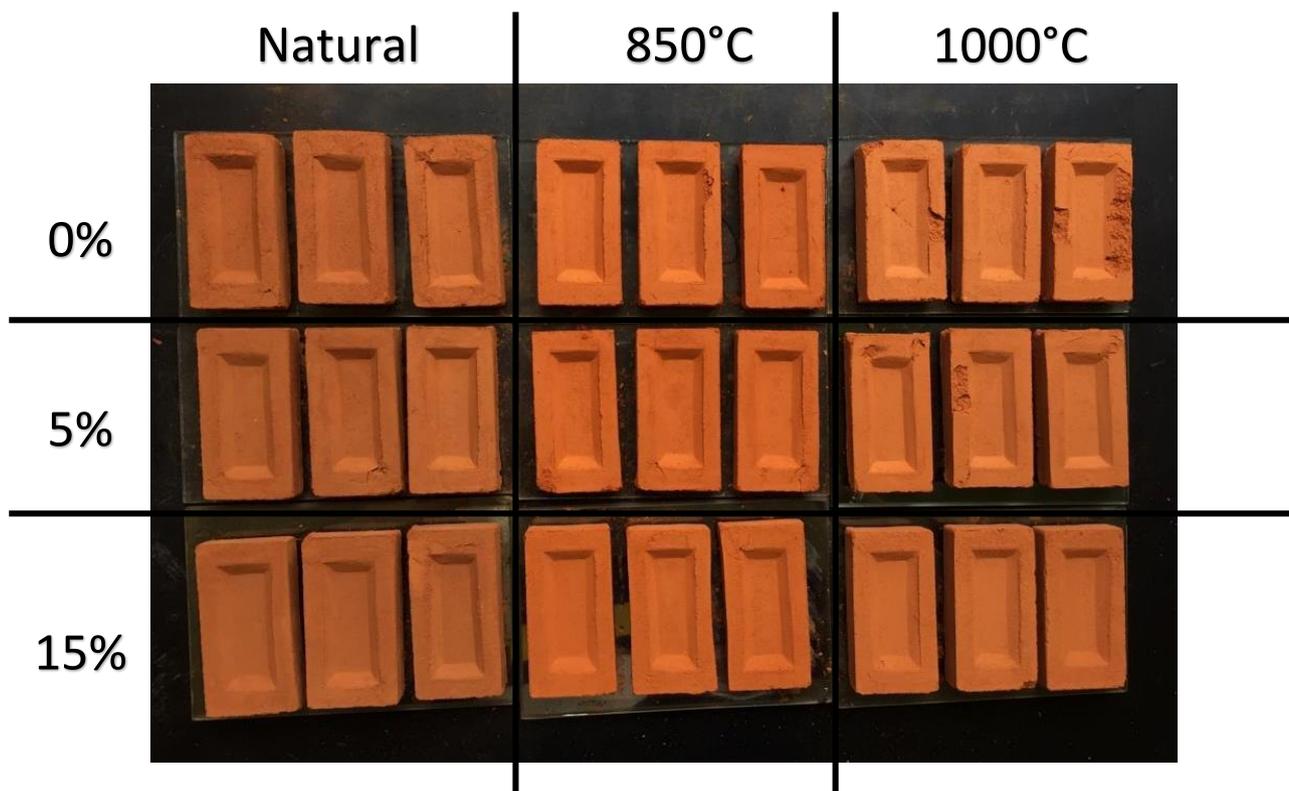


Figura 18: Tijolos após os processos de queima e secagem. Da esquerda para a direita: secagem natural, 850°C, 1000°C.

As comparações foram feitas levando em consideração a porcentagem e substituição e também a temperatura de queima adotada. Nesta figura observa-se maior diferença com relação à temperatura de queima, sendo os tijolos de secagem natural os mais escuros. Os tijolos com temperatura de 1000°C, por sua vez, mostraram-se mais claros.

4.2.2. RETRAÇÃO

Para o teste de retração os comprimentos dos tijolos foram medidos com o auxílio de um paquímetro digital antes e depois da queima. A retração foi

avaliada tanto com relação à porcentagem de substituição como também pela temperatura utilizada na queima. Os resultados são exibidos em Tabela 11 e Figura 19.

Tabela 11: Resultado para retração.

			Média retração (%)		
Secagem	Amostra	Retração (%)	0%	5%	15%
1000°C	1	2,23	2,36	1,76	1,09
	2	2,42			
	3	2,43			
850°C	4	1,84	1,73	1,18	0,67
	5	1,62			
	6	1,72			
Natural	7	0,14	0,18	0,00	0,00
	8	0,16			
	9	0,25			

Para os tijolos feitos apenas com solo, nota-se que as maiores retrações foram obtidas na temperatura de 1000°C. O mesmo pode ser observado nos tijolos utilizando substituição. O gráfico (Figura 19) foi feito para melhor comparação dos resultados, possibilitando a comparação simultânea com relação à temperatura e também porcentagem de substituição.

Levando em consideração a porcentagem de substituição, as maiores retrações foram dos tijolos feitos somente de solo. Já comparando as temperaturas de queima, os tijolos submetidos à temperatura de 1000°C foram os com a maior retração. Portanto, a retração média máxima pode ser observada em tijolos com 0% de substituição e temperatura de 1000°C, sendo ela de 2,36%.

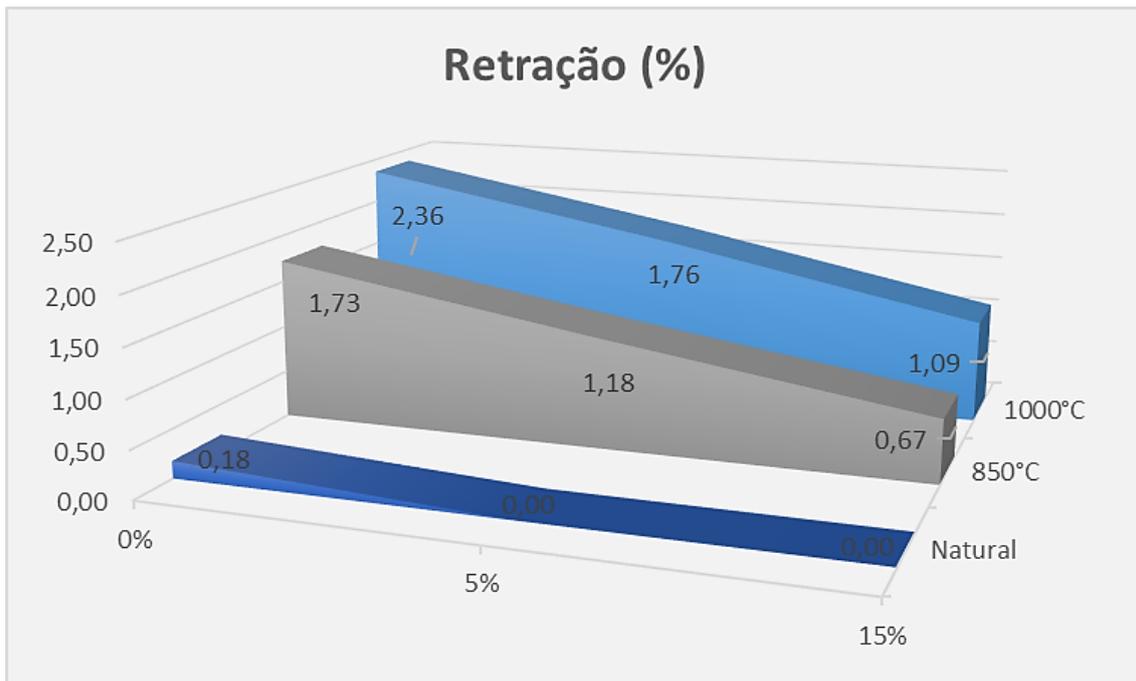


Figura 19: Gráfico para comparação de resultados de retração.

De acordo com Chaves (2009), a retração máxima obtida em seu estudo foi de aproximadamente 5,5%, cuja temperatura era de 1050°C para determinada argila. Já Silva (2014) obteve retração máxima de 2,72% após a queima com temperatura de 950°C para estudo similar. Em ambos os estudos os valores obtidos foram considerados baixos.

Retrações muito elevadas não são indicadas porque podem resultar em deformações das peças, sendo prejudicial à sua utilização. Os resultados obtidos para este parâmetro foram baixos, mesmo na pior condição, sendo ela a de retração máxima.

4.2.3. PERDA MÁSSICA AO FOGO

Para o teste de perda mássica ao fogo, os tijolos foram submetidos à pesagem antes e depois da queima. Essa perda foi avaliada pela porcentagem de substituição e pela temperatura utilizada na queima. Os resultados desse teste são exibidos em Tabela 12 e Figura 20.

Tabela 12: Resultado para perda mássica.

Secagem	Amostra	Perda mássica (%)	Média perda mássica (%)		
			0%	5%	15%
1000°C	1	20,08	20,11	18,11	15,15
	2	19,99			
	3	20,27			
850°C	4	17,06	17,22	15,36	13,04
	5	17,31			
	6	17,29			
Natural	7	0,39	0,39	0,39	0,35
	8	0,32			
	9	0,46			

O gráfico (Figura 20) foi feito para melhor comparação dos resultados de perda mássica, possibilitando a comparação simultânea com relação à temperatura e também porcentagem de substituição.

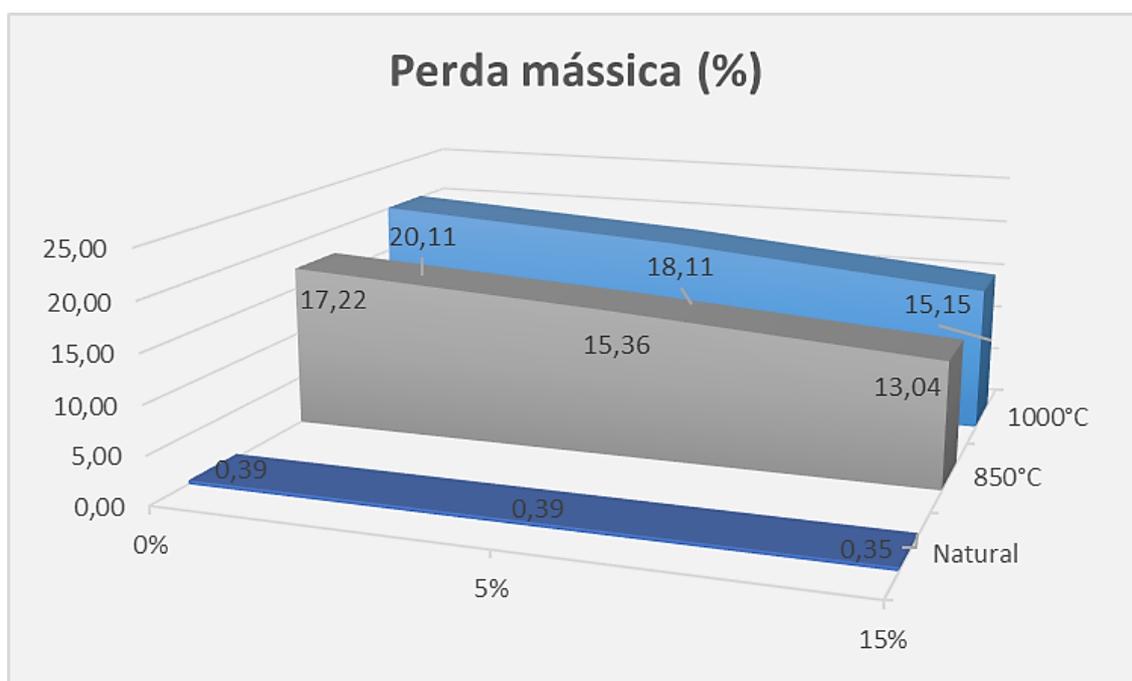


Figura 20: Gráfico para comparação de resultados de perda mássica.

Assim como na retração, a maior perda mássica foi obtida na condição de 0% de substituição e 1000°C. Relacionando os dois resultados, pode-se concluir que a retração e a perda mássica possuem uma relação direta, em que a maior retração foi ocasionada justamente pela maior perda mássica.

Chaves (2009) obteve perda ao fogo máxima de 8,8%, para temperatura de 1050°C. Já Silva (2014) encontrou valor máximo de 13,8%, com 950°C. Comparando o estudo aqui realizado com os exemplos mencionados, a perda ao fogo obtida se mostrou superior à ambos.

Sendo assim, as perdas obtidas para os tijolos submetidos à mufla se mostraram elevadas, podendo estar associada às possíveis quantidades consideráveis de água ou matéria orgânica presentes no solo.

Outra possibilidade para a elevada perda mássica ao fogo obtida pode estar relacionada com a perda de água na estrutura de argilominerais, tanto que nos tijolos com 15% de substituição as perdas são menores.

4.2.4. DUREZA

Conforme mencionado na metodologia, a dureza foi avaliada segundo uma escala comparativa, de 1 a 5 e os resultados obtidos são apresentados em Tabela 13 e Figura 21.

Lembrando que a escala de dureza foi medida de acordo com a facilidade de se riscar os tijolos, com auxílio de um clipe de metal. A escala utilizada foi de 1 a 5, em que mais próximos de 1 estão os tijolos mais fáceis de serem riscados, podendo ser chamados de mais macios. Já aqueles mais próximos de 5 são os mais difíceis ou duros.

Os dados utilizados para elaboração do gráfico (Figura 21) foram médias obtidas dos tijolos em cada condição, considerando temperatura e porcentagem de substituição. A pior condição, ou seja, tijolos mais macios ao risco, foi encontrada nos tijolos de secagem natural e 0% de substituição.

Tabela 13: Dados obtidos de dureza.

Queima	Amostra	Dureza		
		0%	5%	15%
1000°C	1	3	4	5
	2	3	4	5
	3	3	4	5
850°C	4	3	3	4
	5	3	3	4
	6	3	3	4
Natural	7	1	1	3
	8	1	1	2
	9	2	2	2

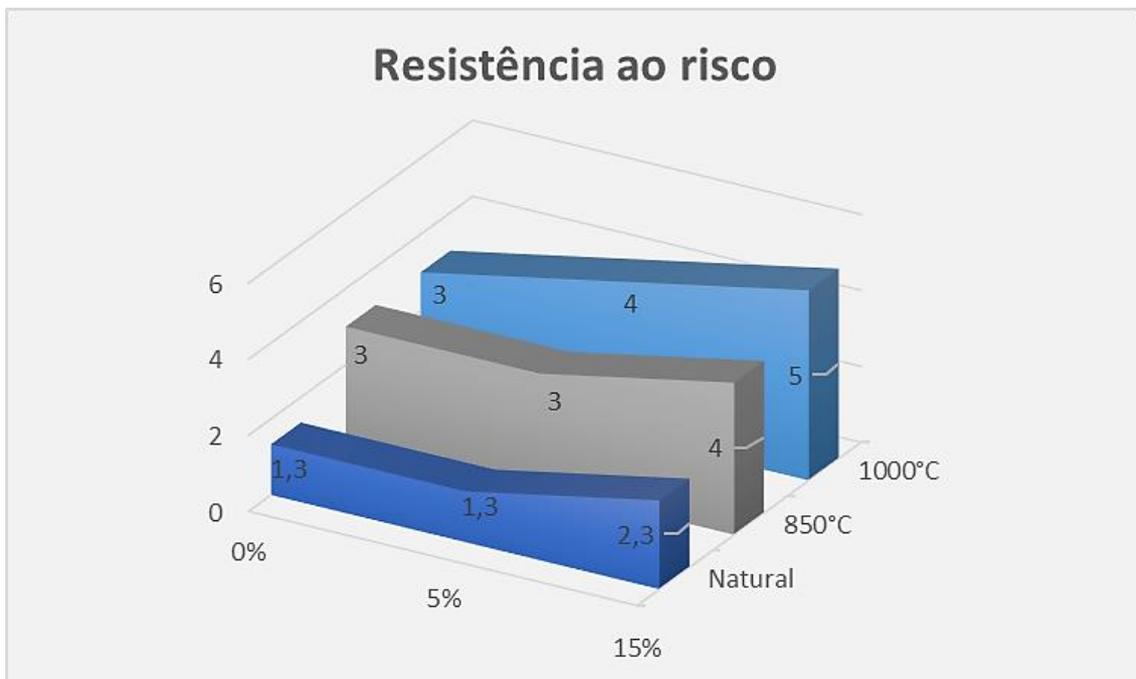


Figura 21: Dureza média.

Conforme destacado por Bauer (2013), a partir de 950°C inicia-se o processo de vitrificação, em que a sílica presente na pasta forma uma pequena quantidade de vidro, auxiliando no processo de aglutinação dos elementos, o que confere à peça maior dureza.

Sabe-se que o rejeito utilizado é composto predominantemente por quartzo, principal fonte de sílica, conforme apresentado nos resultados de composição mineralógica. Sendo assim, pode-se concluir que as maiores durezas encontradas, nas temperaturas de 1000°C e 15% de substituição, podem ter sido influenciadas pelo processo de vitrificação dos grãos de quartzo presentes no rejeito. A vitrificação de grãos auxilia no aumento da dureza porque aumenta a capacidade dos grãos se unirem.

4.2.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados obtidos para tempo médio de absorção de água são apresentados em Tabela 14 e Figura 22.

Tabela 14: Resultados de tempo de absorção.

			Média (s)		
	Amostra	Tempo (s)	0%	5%	15%
1000°C	1	1,78	1,46	0,89	1,00
	2	0,94			
	3	1,66			
850°C	4	1,31	1,42	1,51	1,11
	5	1,54			
	6	1,40			
Natural	7	60,90	48,16	52,50	43,64
	8	55,74			
	9	27,83			

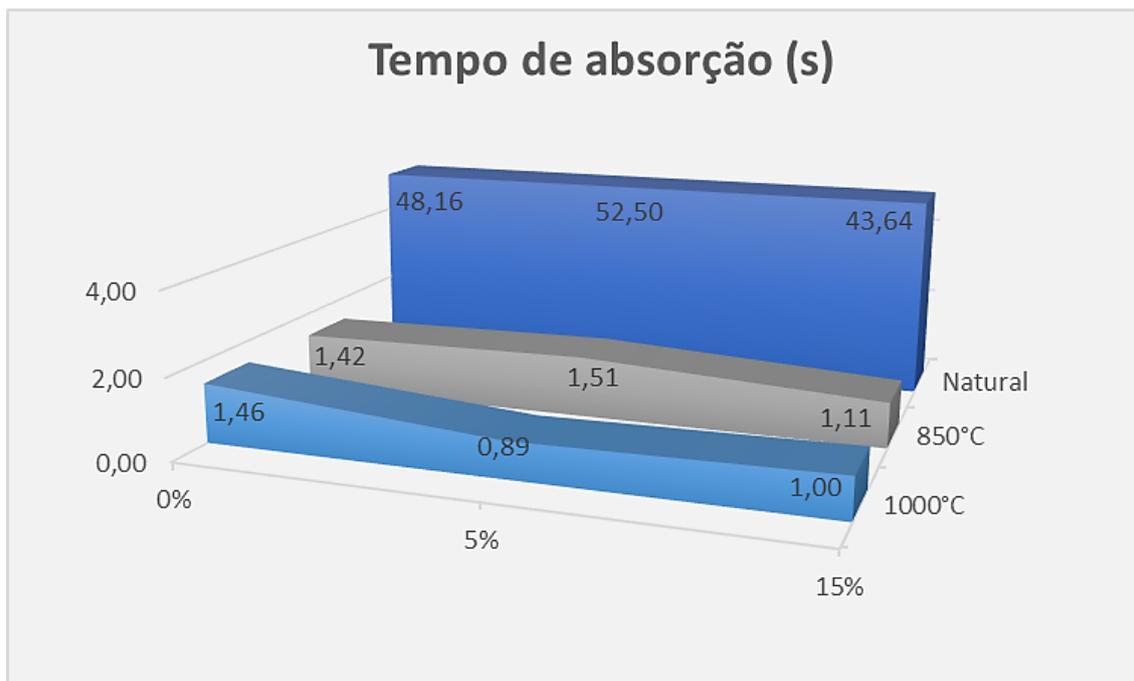


Figura 22: Tempo médio de absorção.

A absorção em tijolos é um aspecto importante e geralmente avaliado em obras, para garantir a qualidade dos tijolos. Afinal, tijolos com tempo de absorção muito elevado se mostram ineficientes na aderência ao cimento ou argamassa, resultando em deslocamentos em construções.

No entanto, tempo de absorção muito baixos resulta em trincas na estrutura, visto que, nessa situação, o cimento e a argamassa são absorvidos rapidamente pelo tijolo.

Os testes de absorção foram feitos a fim de comparar os tijolos fabricados no laboratório. Para os tijolos submetidos à mufla, os tempos foram similares. Já os de secagem natural apresentaram tempo médio de absorção bastante elevado, gastando quase 43 vezes mais tempo para absorção que os tijolos queimados a temperatura de 1000°C.

Isso pode ter sido ocasionado pelo fato de a secagem natural não ser suficiente para retirar toda a água do tijolo. Dessa forma, os espaços vazios entre os grãos mantiveram-se preenchidos com água.

5. CONCLUSÕES

O rejeito utilizado nos testes possui quantidade elevada de quartzo, próximo de 80%. Ainda com relação à composição, os demais minerais majoritariamente encontrados foram ferrosos (hematita, goethita e magnetita), correspondendo a pouco mais de 19%.

Tratando-se da granulometria, houve a predominância de partículas entre 53 e 149 μm , representando 59% da massa total. Aproximadamente 76% das partículas apresentaram-se menores que 149 μm e o maior tamanho obtido foi de 592 μm .

Com relação à granulometria por fases, abaixo de 177 μm tem-se 87% do quartzo, 63% da hematita, 56% da goethita e 60% da magnetita. Conclui-se que as partículas de minerais ferrosos apresentam granulometria mais grossa, destacando-se. Isso justifica a coloração avermelhada/alaranjada do rejeito, apesar de ser predominantemente composto por quartzo.

Para a perda mássica ao fogo, medida após a queima, os valores encontrados foram superiores a outros analisados em trabalhos anteriores. Acredita-se que isso pode ser em decorrência de quantidades elevadas de água ou matéria orgânica no solo.

Uma outra possibilidade para a elevada perda mássica ao fogo obtida pode estar relacionada com a perda de água na estrutura de argilominerais. Mas para confirmação, é importante que novos testes sejam realizados.

Os tijolos com 15% de substituição apresentaram-se como os de melhor aparência, devido a menor ocorrência de imperfeições. Os tijolos com 15% também tiveram maiores facilidade de desmoldar e dureza, quando comparados aos demais.

Os testes de retração mostraram resultados inferiores aos encontrados em outros trabalhos realizados com temática e produtos semelhantes.

Os melhores resultados de dureza, tidos como aqueles mais próximos de 5, foram obtidos nos tijolos queimados a 1000°C e com 15% de substituição. O aumento da quantidade de quartzo, proveniente do rejeito, pode ter

potencializado esse resultado. Isso porque, ao ser submetido à esta temperatura, possibilitou o processo de vitrificação do quartzo, aumentando a dureza do produto final.

Sendo assim, a fabricação de tijolos cerâmicos com substituição de rejeitos de minério de ferro se mostrou um tema pertinente para novos estudos e testes, como resistência dos tijolos fabricados. Pode-se ainda, futuramente, avaliar o aumento da porcentagem de substituição, buscando a quantidade ideal no processo.

6. REFERÊNCIAS

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Cadastro nacional de barragens de mineração: DNPM. *In: Agência nacional de mineração: ANM*, 04 fev. 2015; modificado em 26 fev. 2019. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao/cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Classificação de barragens de mineração: Data-Base – Fevereiro de 2019. *In: Agência nacional de mineração: ANM*, 15 dez. 2016; modificado em 19 fev. 2019. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-classificacao-de-barragens-de-mineracao/plano-de-seguranca-de-barragens>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

AMARAL FILHO, Juarez Ramos do. **Avaliação ambiental e do potencial de aproveitamento de um módulo de rejeitos de carvão na região carbonífera de Santa Catarina**. 2009. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ASSIS, Dewmasyker Moura; QUEIROGA, Fyama Otaviana da Costa Sório; MENDES, Júlia Castro. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na fabricação de tijolos maciços. **Ágora - A revista científica da FaSaR**, [S. l.], p. 191-200, jul. 2018.

ÁVILA, Kelly de Souza Pires. **Caracterização mineralógica de rejeitos de flotação de itabiritos do Quadrilátero Ferrífero utilizando mineralogia quantitativa eletrônica**. 2018. Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

AZEVEDO, Gislaine Handrinelly de; VITAL, Adriana de Fátima Meira. Aproveitamento do rejeito das indústrias de beneficiamento do caulim para a produção de tinta ecológica à base de terra. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, p. 242-247, jul/set. 2018.

BARROS, João Alfredo de Almeida. **Estudo de aproveitamento do rejeito da mineração de esmeraldas na produção de refratários conformados**

isolantes. 2013. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

BATES, Jeremy. **Barragens de rejeitos**. São Paulo: Signus, 2002.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção, volume 2: novos materiais para construção civil**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CARMO, S. S. *et al.* Estudos de caracterização tecnológica em amostras de minério de ferro de baixo teor. **HOLOS**, [S. l.], ano 30, v. 3, fev. 2014. p. 35-43.

CHAVES, Leonardo Flamarion Marques. **Estudo da adição do resíduo proveniente da extração de minério de ferro em argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. Tese (Doutorado em ciência e engenharia de materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

COBA S.A. Serviços analíticos e construtivos em segurança de barragens: Produto 6 – Classificação de barragens reguladas pela Agência Nacional de Águas – Contrato nº051/ANA/2012. Brasília, p. 7-8, 1 nov. 2014.

COSTA, Evair Nunes da. **Peneiramento de partículas finas e ultrafinas com adição de dispersantes**. Orientador: Dr. André Carlos Silva. 2014. 78 p. Monografia (Especialização em tratamento de minérios) - Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão, Catalão, 2014.

COTA, Tiany Guedes. **Incorporação de resíduos da fabricação de ferro-liga de manganês e de finos de esteatito na produção de cerâmica vermelha**. 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

DAUCE, Pedro Domingos. **Caracterização tecnológica de rejeito de jigagem de minério de ferro**. 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **NRM 18: beneficiamento**. Pernambuco, 2001.

FERNANDES, G. *et al.* Estudo de resíduos de minério de ferro para utilização em pavimentos. *In*: ICTR 2004 - CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E

TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2004, Costão do Santinho - Florianópolis - Santa Catarina, 2004.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas. Introdução ao tratamento de minérios. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina A. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MACHADO, A. F. *et al*, **Aproveitamento de rejeito de mineração na blindagem de calcário comercial para correção do solo**. Amazon Soil – I Encontro de Ciência do Solo da Amazônia Oriental, 2014, p. 17-27.

MACHADO, Mayare de Souza Moura Maciel. **Blocos para construção civil feitos com rejeitos depositados na Barragem de Candonga**. 2018. Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

MANTILLA, Edgar Rodo. **Avaliação da liberação mineral por análise de imagens digitais obtidas em microscópio óptico de luz refletida**. Orientador: Roberto Galery. 2013. 115 p. Dissertação (Mestrado em engenharia metalúrgica, materiais e de minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MENEZES, R. R. *et al*. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas. **Cerâmica 5S**, [S. l.], p. 263-270, 2009.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JUNIOR, M. C. **As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos**. Revista Cerâmica Industrial, v. 6, n. 2, 2001.

NEUMANN, Reiner; SCHNEIDER, Claudio Luiz; NETO, Arnaldo Alcover. Caracterização mineralógica de minérios - parte 2. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina A. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

NOCITI, Denyse Meirelles. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas**. 2011. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica na área de materiais) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

OLIVEIRA, Michelly dos Santos; SILVA, Luís Alberto; ALVES, Luciana Pereira. IMPORTÂNCIA DO USO DA TÉCNICA ADEQUADA DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA PARA CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO FOSFÁTICO FINO. **Educação & Tecnologia**, [S.l.], v. 22, n. 3, ago. 2018. ISSN 2317-7756. Disponível em: <<https://periodicos.cefetmg.br/index.php/revista-et/article/view/798>>. Acesso em: 16 nov. 2019.

OLIVEIRA, Antonio P. N. de. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**” Cerâmica Industrial, n. 5 vol. 6, Novembro/Dezembro 2000: 37-47.

PORPHÍRIO, Ney H.; BARBOSA, Marília Inês M.; BERTOLINO, Luiz Carlos. Caracterização mineralógica de minérios - parte 1. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina A. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

RIBEIRO, Luís Fernando Martins. **Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos**. Orientador: André Pacheco de Assis, PhD. 2000. Tese (Doutorado em engenharia civil e ambiental) - Universidade de Brasília - Faculdade de tecnologia, Brasília, 2000.

REIS, Érica Linhares. **Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico-carbonatado da RDM - unidade morro da mina**. Orientador: Dra. Rosa Malena Fernandes Lima. 2005. 141 p. Dissertação (Mestrado em engenharia mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

RUBIO, Jorge; OLIVEIRA, Cristiane; SILVA, Renato. Aspectos ambientais nos setores mineiro e metalúrgico. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina A. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

SALES, C. G. **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do *underflow* do espessador de lammas da usina de Burucutu**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SANTOS, Claudio Govêa dos *et al.* Adição de rejeitos de extração de ardósia em concreto. **Pós em revista do centro universitário Newton Paiva**, [S. l.], p. 100-103, 2013.

SILVA, Rodolfo Gonçalves Oliveira da. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero**. 2017. Tese (Doutorado em geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SILVA, Fabiane Leocádia da. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de pavers e cerâmica**. 2014. Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SILVA, Lays Capingote Serafim *et al.* Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração. **SIMPROD**, São Cristóvão/SE, IX. ed. p. 260-274, nov./dez. 2017. Anais do IX Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe (2017).

SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. 2015. Monografia (Especialização em construção civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SOARES, Lindolfo. Barragem de rejeitos. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina A. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

TAKEHARA, L. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração Sinter Feed**. Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TOLENTINO, Marcus Vinicius Campos. **Estudo da viabilidade técnica do aproveitamento do resíduo arenoso da mineração do itabirito**. 2010. Dissertação (Mestrado em ciência e tecnologia das radiações, minerais e materiais) - Centro de desenvolvimento da tecnologia nuclear, Belo Horizonte, 2010.