



**REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
Departamento de Engenharia de Minas
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais - Brasil**



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA DE MINAS

**APROVEITAMENTO DE REJEITO DA CONCENTRAÇÃO DE
MINÉRIO DE FERRO NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA
VERMELHA**

PAÔLLA DE CARVALHO BARBOSA

Ouro Preto, março de 2017

PAÔLLA DE CARVALHO BARBOSA

**APROVEITAMENTO DE REJEITO DA CONCENTRAÇÃO DE
MINÉRIO DE FERRO NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA
VERMELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
de Minas da Escola de Minas da
Universidade Federal de Ouro Preto,
como parte dos requisitos para
graduação em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Érica Linhares dos Reis

Ouro Preto, março de 2017

B238a Barbosa, Paôlla de Carvalho.
Aproveitamento de rejeito da concentração de minério de ferro na produção de cerâmica vermelha [manuscrito] / Paôlla de Carvalho Barbosa. - 2017.

34f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Érica Linhares Reis.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Minérios de ferro. 2. Cerâmica. 3. Rejeitos. I. Reis, Érica Linhares. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 553.32:666.3



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 14 dias do mês de março de 2017, às 10:00h, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA**”, pela aluna **Paõlla de Carvalho Barbosa**, sendo a comissão avaliadora formada por **Profª. Drª Érica Linhares Reis (Orientadora)**, **Prof. M.Sc. Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da Silveira** e **Engª de Minas Tiany Guedes Cota**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela ~~aprovação~~... da candidata, com a nota ~~8,5~~... concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Profª. Drª. Érica Linhares Reis
Presidente da Comissão Avaliadora e Professora Orientadora

Prof. M.Sc. Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da Silveira
Membro da Comissão Avaliadora

Engª de Minas Tiany Guedes Cota
Membro da Comissão Avaliadora

Paõlla de Carvalho Barbosa

Prof. Ms.C. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

AGRADECIMENTOS

À Professora Érica Linhares dos Reis pela orientação, incentivo e pelos conselhos durante a elaboração deste trabalho;

Aos técnicos do Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas, pelas contribuições na realização dos ensaios e na preparação das amostras;

Aos membros da banca examinadora, Marcus Alexandre de C. W. da Silveira e Tiany Guedes Cota por aceitarem o convite e pelas sugestões adicionais a esse trabalho.

RESUMO

A grande quantidade de resíduos gerados pela indústria mineradora tem sido causadora de vários problemas ambientais não só no Brasil, como no mundo. Os processos de lavra e beneficiamento do minério de ferro podem ser citados como exemplo de geração desses resíduos. Sendo assim, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de novas técnicas de utilização e reciclagem desses resíduos para que haja uma minimização dos impactos gerados pela disposição dos mesmos. Este trabalho tem como objetivo avaliar a incorporação do rejeito da concentração de minério de ferro de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero como matéria-prima para fabricação de cerâmica vermelha. Para confecção dos corpos de prova, as composições foram preparadas com substituição de 10% da massa de solo por rejeito de minério de ferro. A pressão de compactação utilizada foi 21MPa e a temperatura de queima foi 1000°C por 180 minutos. Em seguida, foram medidas as propriedades de retração linear de secagem (RLS), retração linear de queima (RLQ), perda de massa por secagem (PMS), perda de massa por queima (PMQ), massa específica de queima (MEQ), absorção de água (AA) e resistência à compressão simples (RCS). Esses resultados foram comparados com resultados obtidos em ensaios realizados previamente com corpos de prova confeccionados apenas com o solo argiloso. A diferença entre os valores de retração linear e perda de massa de secagem e de queima nas diferentes composições foi muito pequena. Os valores de absorção de água e resistência à compressão para os corpos de prova com a substituição por rejeito de minério de ferro foram de 27% e 42,3MPa. Os parâmetros analisados mostraram que a composição está dentro das especificações para produção de alguns tipos de materiais cerâmicos.

PALAVRAS-CHAVE: minério de ferro, cerâmica, aproveitamento de rejeitos.

ABSTRACT

The large amount of waste generated by the mining industry has been causing several environmental problems not only in Brazil, but also in the world. The processes of mining and beneficiation of iron ore can be cited as an example of this waste production. Therefore, it is becoming increasingly necessary to develop new techniques for the use and recycling of these wastes so that there is a minimization of the impacts generated by their disposal. This work aims to evaluate the incorporation of the iron ore concentration of a Quadrilátero Ferrífero iron ore miner as raw material for the production of red ceramics. For preparation of the test specimens, the compositions were prepared with 10% of the soil mass replaced by iron ore tailings. The compaction pressure used was 21MPa and the firing temperature was 1000 ° C for 180 minutes. After that, it was measured the linear drying retraction, dry mass loss, loss of mass per firing, specific mass of firing, water absorption and simple compressive strength. These results were compared with results obtained in previous tests with test specimens made only with clay soil. The difference between the values of linear retraction and loss of mass of drying and burning in the different compositions was very small. The water absorption and compressive strength values for the test specimens with the substitution for iron ore tailings were 27% and 42.3MPa. The parameters analyzed showed that the composition is within the specifications for the production of some types of ceramic materials.

KEYWORDS: iron ore, ceramic, waste employment.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVO.....	7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1. Minério de ferro – Aspectos gerais	8
3.1.1. Beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos	9
3.2 Materiais cerâmicos.....	12
3.3.1. Propriedades das argilas	14
3.3.2 Sinterização de argilas.....	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1 Caracterização das matérias primas utilizadas para a confecção dos corpos de prova de cerâmica vermelha	17
4.2 Confecção e queima dos corpos de prova cerâmicos	19
4.3 Ensaio tecnológico para cerâmica.....	22
4.3.1 Retração linear de secagem (RLS)	22
4.3.2 Retração linear de queima (RLQ)	22
4.3.3 Perda de massa na secagem (PMS)	23
4.3.4 Perda de massa na queima (PMQ)	23
4.3.5 Massa específica após a queima (MEQ)	23
4.3.6 Ensaio de absorção de água.....	24
4.3.7 Ensaio de resistência à compressão.....	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1 Identificação dos parâmetros dos corpos de prova.....	26
5.1.1 Retração linear de secagem (RLS) e retração linear de queima (RLQ)	26
5.1.2 Perda de massa na secagem (PMS) e perda de massa na queima (PMQ)	26
5.1.3 Massa específica após a queima (MEQ)	27
5.1.4 Ensaio de absorção de água (AA)	27
5.2 Ensaio de resistência à compressão (RC).....	28
6. CONCLUSÃO	30
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

A mineração é considerada uma das principais atividades econômicas do Brasil. Essa importância se deve tanto pela produção de riquezas minerais, quanto pela geração empregos, o que faz com que essa atividade tenha papel de destaque no Produto Interno Bruto (PIB) do país.

Apesar da grande importância econômica, a indústria de mineração também é responsável pela geração de um impacto ambiental significativo. O processo de beneficiamento de minérios gera não só o concentrado, que é o material de interesse, como também, rejeitos, que não apresentam interesse econômico e que normalmente são dispostos em barragens. Vale ressaltar que esses rejeitos são muito danosos ao meio ambiente, e por isso, é de grande importância a busca de uma alternativa para a utilização dos mesmos, uma vez que a disposição em barragens de rejeito não é a forma mais adequada e nem mais segura, tanto ambientalmente, quanto pelo lado da segurança do ser humano.

Segundo a FEAM (2012) somente no estado de Minas Gérias existem 746 barragens de rejeito de mineração, o que equivale a 91,4% do total no país. Recentes acidentes envolvendo barragens vêm despertando maior atenção para essas estruturas e reforçando a necessidade da busca de uma forma de aproveitamento desses rejeitos.

O presente trabalho apresenta o estudo sobre a viabilidade da substituição de parte do solo argiloso por frações de um rejeito de minério de ferro na produção de cerâmica vermelha. Se essa viabilidade for comprovada, será possível não só produzir um material de menor custo, como também, diminuir o impacto ambiental causado pela disposição desses rejeitos, aumentando assim, a sustentabilidade da atividade mineira.

2. OBJETIVO

Estudar a viabilidade do uso de rejeito da concentração de minério de ferro proveniente de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero como aditivo na fabricação de cerâmica vermelha, visando diminuir o custo da fabricação dessa cerâmica, bem como a disposição desse rejeito no meio ambiente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Minério de ferro – Aspectos gerais

O minério de ferro é um agregado mineral a partir do qual extrai-se o ferro (Fe), que é a matéria prima essencial na siderurgia para a produção de aço. O ferro é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, constituindo aproximadamente 4,2% da litosfera. Os principais minerais que contém o ferro são: hematita, magnetita, goethita e siderita, e os maiores depósitos desse recurso mineral no Brasil são constituídos por formações ferríferas denominadas itabiritos, compostas de hematita e sílica (QUARESMA, 2001).

O ferro foi responsável por consideráveis mudanças na história da humanidade, sendo utilizado para substituir o bronze na confecção de utensílios, ferramentas e armas, período conhecido como Idade do Ferro. Nos dias de hoje, é praticamente impossível imaginar a vida humana sem o ferro. O elemento é a principal matéria prima do aço, que além de ser utilizado na produção de máquinas, ferramentas, veículos e como elemento estrutural na construção civil, ainda apresenta muitas outras finalidades.

Segundo o DNPM (2014), as reservas mundiais de minério de ferro totalizam aproximadamente 170 bilhões de toneladas. Porém, essas reservas são encontradas em poucos países, sendo que cinco deles detêm 77% do potencial de extração do produto. O Brasil possui a quinta maior reserva do mundo, e as reservas lavráveis brasileiras, com um teor médio de 49,0% de ferro, representam 13,6% das reservas mundiais. Os principais estados brasileiros detentores de reservas de minério de ferro são: Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará.

De acordo com o U.S Geological Survey e a UNCTAD (Conferência das Nações Unidas para o Comércio e o Desenvolvimento), o Brasil ocupa a posição de segundo lugar no ranking dos maiores produtores de minério de ferro. De acordo com essas fontes, em 2011, em se tratando de teor do minério produzido, a Austrália produziu 480 milhões de toneladas, o Brasil 390 milhões de toneladas, e a China 380 milhões de toneladas de minério de ferro (IBRAM, 2012).

A comercialização do minério de ferro depende de suas características físicas, referentes ao tamanho das partículas (granulação), e químicas, que corresponde aos teores de ferro e de suas impurezas.

3.1.1. Beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos

O beneficiamento mineral é o tratamento pelo qual o minério deve passar após ser lavrado na mina a fim de ser adequado às características necessárias para a sua comercialização.

De acordo com a NRM 18, esse tratamento visa preparar granulometricamente e concentrar ou purificar os minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais.

Luz (2010) relata que em um processo de beneficiamento mineral existe basicamente as seguintes etapas:

1. Cominuição: nesta etapa, quebra-se o material para se obter o grau de liberação necessário nas próximas etapas do processo. A britagem, que consiste na quebra do material mais grosso, é a primeira etapa do processo. São utilizados britadores que promovem a fragmentação mecânica do material. Na moagem, são utilizados moinhos que são responsáveis pela redução do tamanho dos grãos até a ordem de milímetros ou até micrômetros.
2. Peneiramento e classificação em meio fluido : o minério passa pela operação de peneiramento com diversas peneiras de diferentes aberturas. Partículas maiores que a abertura da tela ficam retidas e as menores passam por ela. O material passante é submetido a classificação em meio fluido, que separa as partículas por tamanho de acordo com seu comportamento na água. Os principais equipamentos utilizados para essa operação são o ciclone e o classificador espiral.
3. Concentração: possibilita o aproveitamento do minério de baixo teor. O principal objetivo é separar o minério em duas frações: a concentrada e a descartável (rejeito). Os diferentes processos removem a maior parte dos elementos não-valiosos, aumentando assim o teor do minério. Algumas etapas principais da concentração são: o método gravítico, a separação magnética e a flotação.

4. Desaguamento obtido através da filtração e secagem: esta etapa consiste na separação sólido-líquido, e é na qual se obtém o concentrado final.

5. Disposição dos rejeitos gerados na usina: após a obtenção do concentrado, todo o material considerado fora das especificações de produção é depositado em barragens de rejeito.

Segundo a FEAM, esses materiais que não apresentam interesse econômico são dispostos em pilhas de estéreis e barragens de rejeitos, sendo que os materiais estéreis podem ser depositados novamente na cava exaurida para a recuperação ambiental. Porém, resíduos de concentração, apresentam composição química e granulometria muito distintas do solo original, o que implica na necessidade de outras destinações para a redução de seu impacto sobre o meio ambiente (YELLISHETTY, *et al.*, 2008).

A figura 3.1.1 apresenta um fluxograma típico do beneficiamento de minério de ferro.

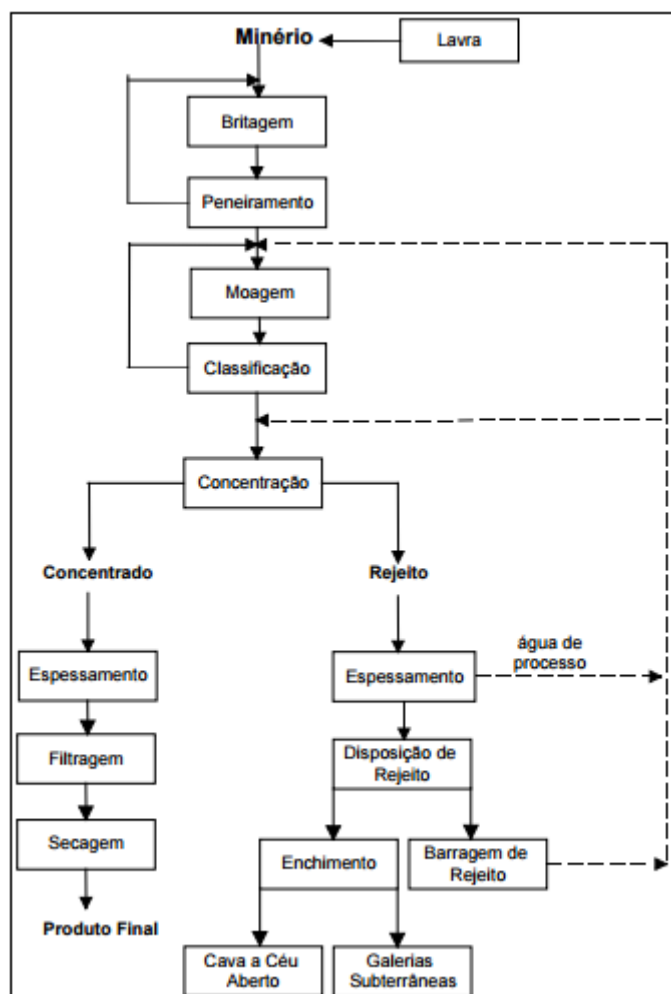


Figura 3.1.1: Fluxograma típico da concentração de Minérios. Fonte: LUZ, 2010.

A crescente demanda de minério de ferro e a escassez das reservas com alto teor desse material fazem com que aumente a necessidade da otimização dos processos de concentração para que se torne possível a lavra de depósitos com teores mais baixos. Um processo de concentração mais eficiente, nos dá maior recuperação do material de interesse, gerando concentrados mais ricos e conseqüentemente, rejeitos mais empobrecidos.

Porém, ainda assim, a disposição desses rejeitos não deixa de ser um grande obstáculo para a indústria de mineração. Por isso, a preocupação com a conservação ambiental tem levado cada vez mais às buscas para o aproveitamento de rejeitos. Uma das possibilidades de aproveitamento muito estudada recentemente é a utilização desses rejeitos na construção civil.

Ferreira (2013) estudou a utilização de escória da fabricação de ferro-ligas de manganês e de finos da produção de artesanatos de pedra-sabão para a produção de tijolos solo-cal. Foram confeccionados corpos de prova, utilizando diferentes proporções em substituição da cal, e diferentes tempos de cura. Os resultados obtidos mostraram que os corpos de prova solo-cal com 25% de incorporação de finos de pedra sabão com tempo de cura de 28 e 60 dias e o corpo de prova com 25% de incorporação de escória de ferro-ligas de manganês com tempo de cura de 60 dias são viáveis para a utilização como tijolos solo-cal.

Yellishetty, *et al.*, (2008) estudaram a utilização de resíduos de uma mina de minério de ferro da Índia na construção civil, e chegaram a conclusão de que diferentes frações granulométricas poderiam ser empregadas em diferentes produtos:

- Partículas com granulação de 12,5mm a 20mm, o que significa cerca de 50 a 60% dos resíduos, são bastante adequadas para a fabricação de concreto.
- Partículas com granulação entre 4,75mm a 12,5mm apresentam grande potencial para serem utilizadas como areia para obras de construção diversas.
- Partículas inferiores a 4,75mm se mostraram bastante adequadas para a fabricação de tijolos.

Silva (2014) estudou o potencial de utilização do rejeito da concentração de minério de ferro do Brasil para a produção de pavers de concreto e cerâmica. O estudo foi realizado

substituindo diferentes proporções de areia, no caso dos pavers, e de argila, no caso da cerâmica por esse rejeito. Os resultados obtidos comprovaram a viabilidade da utilização desse rejeito na produção de ambos os produtos.

Chen, *et al*, (2011) avaliaram a possibilidade da utilização de rejeitos de minério de ferro da China para a fabricação de tijolos ecológicos. Além de rejeitos, foi utilizado argila e as cinzas obtidas de precipitadores eletrostáticos de uma usina térmica. A conclusão mostrou a possibilidade de se fabricar tijolos utilizando rejeitos da concentração de minério de ferro, podendo utilizar-se até 84% de rejeitos em relação ao peso total dos compostos.

3.2 Materiais cerâmicos

Os materiais sólidos dividem-se basicamente em materiais cerâmicos, metais e materiais orgânicos, sendo que, os materiais cerâmicos têm sido utilizados em construções desde os primórdios, e suas qualidades como: durabilidade, resistência e rigidez garantem seu emprego de forma altamente confiável (PATTON, 1976).

A facilidade de fabricação e a abundância de matéria-prima fez com que a indústria de cerâmica fosse uma das mais antigas do mundo. Cerâmica pode ser definida como um material obtido pela moldagem, secagem e sinterização de argilas ou de misturas contendo argilas (BAUER, 1980).

No Brasil, existem aproximadamente 11000 empresas que fabricam cerâmicas, sendo que cerca de 3600 estão localizadas na região sudeste (MOTTA, *et al.*, 2001).

A qualidade dos produtos está ligada diretamente à qualidade da argila, cuja classificação é feita de acordo com a sua composição mineralógica. Feita a classificação, são delimitados os seus diversos usos.

A norma da ABNT 7170 define tijolo maciço como feito de argila, que possui todas as faces lisas e dimensões variadas, podendo ser extrudado ou prensado e ao ser queimado, obtém um produto com as características que estejam dentro dos padrões de exigências

da ABNT. A Figura 3.2 mostra um fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.

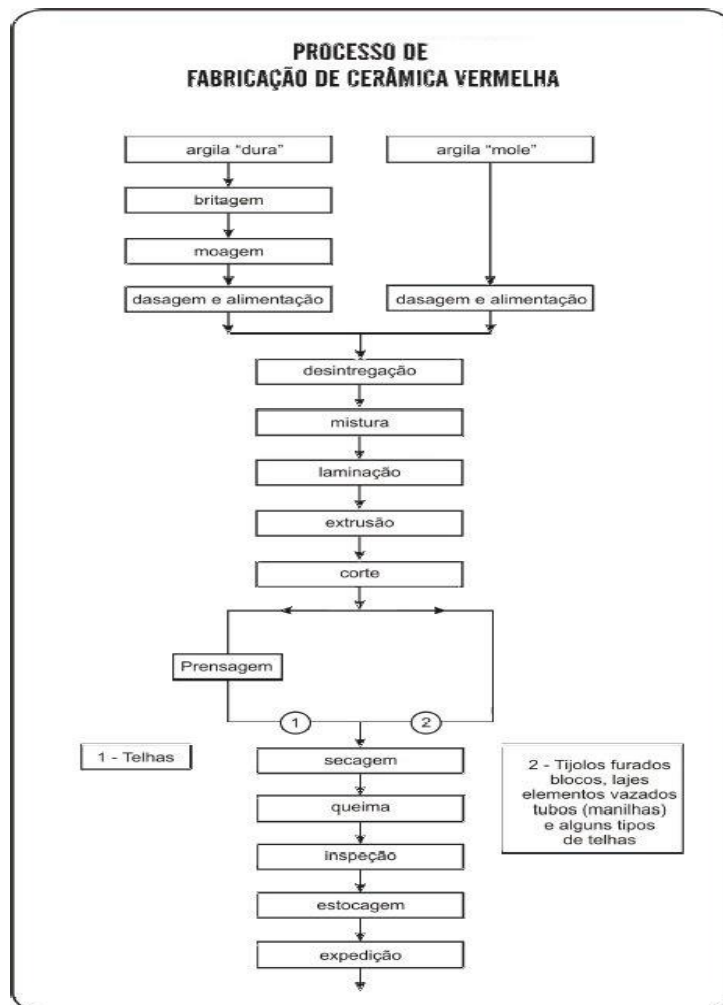


Figura 3.2: Fluxograma do processo produtivo de cerâmica vermelha. Fonte SILVA, 2014.

A argila é um material de granulação fina, constituída principalmente por argilominerais, podendo também conter minerais que não são considerados argilominerais, tais como calcita, dolomita, gipsita, quartzo, aluminita e pirita. Em sua composição também é encontrada matéria orgânica, além de outras impurezas. A argila apresenta naturalmente forma lamelar ou fibrosa, característica definida pela estrutura dos argilominerais (SANTOS, 1975).

De acordo com a ABNT, as argilas são compostas de partículas de diâmetro inferior a 0,005mm sendo que, quando misturadas com água, adquirem alta plasticidade, sendo facilmente moldada, e quando secas, formam torrões muito difíceis de serem desagregados pela pressão dos dedos. A argila é uma substância de grande importância

devido à sua utilização na confecção de vários produtos como o tijolo comum, de pavimentação, telhas e manilhas para esgoto. A argila de alta qualidade, conhecida como argila de porcelana ou caulim, tem empregos como a fabricação de papel, a indústria da borracha e a manufatura de refratários (SILVA, 2014).

De acordo com o DNPM (2006), as principais reservas de argila do Brasil, mais de 70%, estão concentradas em quatro estados, onde estão localizados os mais importantes pólos de cerâmica vermelha.

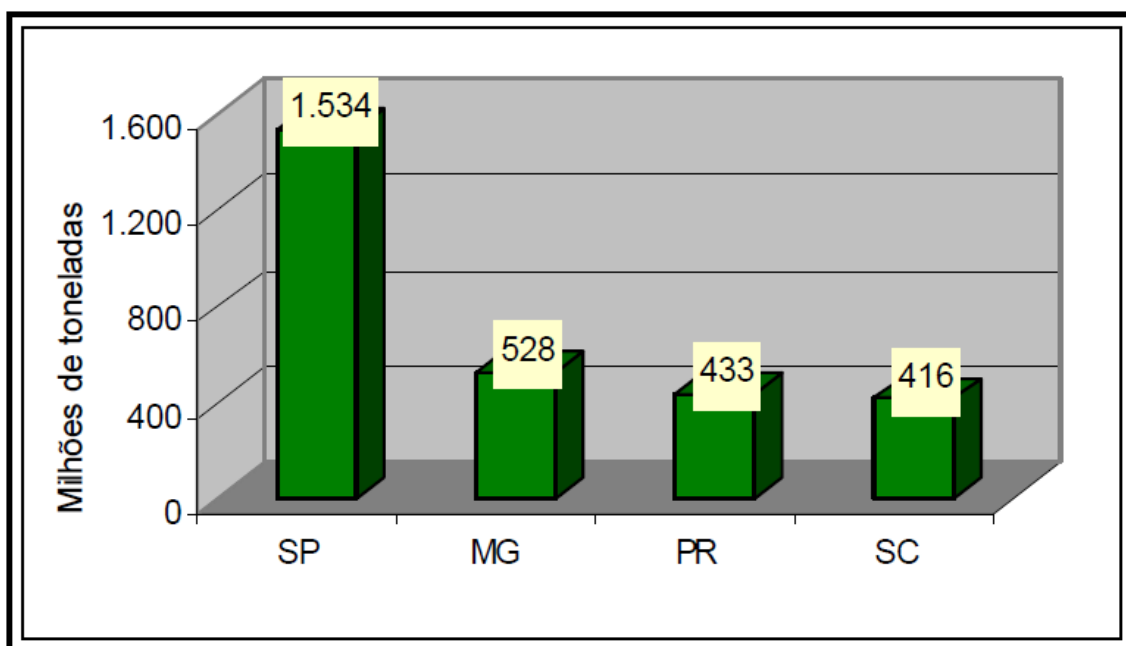


Figura 3.3: Localização das principais reservas de argila no Brasil. Fonte: AMB (DNPM, 2006).

3.3.1. Propriedades das argilas

Segundo ALVES (1987), uma das principais propriedades das argilas é a granulação, pois ela influencia não só nos processos de secagem e sinterização, como também nas propriedades finais dos corpos cerâmicos, tais como plasticidade, tensão e módulo de ruptura à flexão. A composição mineralógica e a forma das partículas também são características muito importantes das argilas, pois elas também contribuem diretamente para a qualidade dos corpos cerâmicos. Outras propriedades como a cor, são largamente

estudadas. A argila utilizada para fabricação da cerâmica vermelha pode ser encontrada em diversas cores como: verde, preta, vermelha, e marrom, (SANTOS, 1975).

Segundo Bauer (1980), as argilas também podem ser classificadas como gordas ou magras, de acordo com a quantidade de colóides. Assim, as argilas gordas são muito plásticas, e costumam deformar-se muito mais no cozimento devido a presença da alumina. Já as argilas magras, devido ao excesso de sílica, são mais porosas e frágeis.

A retração por secagem é a medida da variação do comprimento ou do volume durante a secagem do corpo cerâmico em estufa. Ela é um dos principais problemas discutidos na literatura, pois ela pode gerar defeitos como fissuras no produto final. Bauer (1980) relata que a secagem deve ser realizada de forma uniforme e controlada para evitar esse tipo de problema.

O tamanho do produto final é influenciado pela retração linear. Os requisitos de qualidade das placas cerâmicas para revestimentos são estabelecidos através de normas nacionais (NBR 13818/1997) e internacionais (ISO 13006/2012), sendo que um destes requisitos é a uniformidade dimensional. O tamanho final de uma placa cerâmica é o resultado das variações dimensionais sofridas durante o processo produtivo, desde a conformação até a queima.

3.3.2 Sinterização de argilas

Segundo Bauer (1980) a principal etapa da fabricação dos materiais cerâmicos é a sinterização, pois é durante a queima que acontecem várias reações químicas e físicas, sendo algumas rápidas, outras mais lentas, algumas que se completam, outras que devem ser evitadas, algumas que ocorrem no início do processo, e outras ao final.

Muitas variáveis podem influenciar nessa etapa, por isso, além da temperatura alcançada, fatores como velocidade de aquecimento e de resfriamento, atmosfera ambiente e tipo de forno utilizado também influenciam diretamente na etapa de sinterização. Assim como na secagem, deve existir uma uniformidade de calor no forno para que umas peças não fiquem mais ou menos queimadas que as outras, resultando assim em uma boa sinterização (CARGNIN, *et al.*, 2011).

A sinterização é um processo que tem como objetivo diminuir a porosidade dos corpos cerâmicos removendo os espaços vazios entre as partículas e fazendo com que haja uma retração da peça. Por isso, após a sinterização são esperados corpos com maior resistência mecânica e menores níveis de absorção de água.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização das matérias primas utilizadas para a confecção dos corpos de prova de cerâmica vermelha

A metodologia aplicada neste trabalho visou à incorporação de um rejeito de minério de ferro proveniente da etapa rougher da separação magnética de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero para a confecção de corpos de prova de cerâmica vermelha. Tanto o solo argiloso quanto os resíduos utilizados para a confecção dos corpos de prova foram previamente caracterizados por Ferreira (2013) e Silva (2015), respectivamente. Os dados de caracterização do solo obtidos por Ferreira (2013) estão apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1: Dados da caracterização da amostra de solo argiloso.

Dados da Caracterização da Amostra de Solo Argiloso	
Área superficial (m ² /g)	32,414
Densidade (g/cm ³)	2,593
Porosidade (%)	1,6
Umidade (%)	12,530
d ₈₀ (µm)	700
Perda por Calcinação (%)	12,05

Fonte: Adaptado de Ferreira (2013)

Tabela 4.2: Composição química da amostra de solo argiloso e minerais identificados pelo difratograma de raios X.

Composição química da amostra de solo argiloso										
Teores (%)									ppm	
Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	SO ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	SiO ₂	As	Zn
28,91	5,96	-	0,143	-	-	1,48	0,64	62,62	5,38	36,70
Minerais identificados pelo difratograma de raios X										
Quartzo (SiO ₂)										
Caulinita (SiO ₂ Al ₂ O ₅ (OH) ₄)										
Muscovita (KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂)										
Fonte: Adaptado de Ferreira (2013)										

Os dados referentes à caracterização da amostra de rejeito de minério de ferro estão apresentados na Tabela 4.3

Tabela 4.3: Dados da caracterização da amostra de rejeito.

Dados da Caracterização da Amostra de Rejeito de Minério de Ferro	
Densidade (g/cm ³)	2,92
d ₅₀ (µm)	60
d ₈₀ (µm)	120
Minerais identificados na amostra pelo difratograma de raios X	
Quartzo (SiO ₂)	
Hematita (Fe ₂ O ₃)	
Ilmenita (FeTiO ₂)	
Fonte: Adaptado de Silva (2015)	

Tabela 4.4: Análise Química da amostra de rejeito.

	Teor (%)
Sílica (SiO ₂)	89,41
Ferro (Fe)	7,4

Fonte: Adaptado de Silva (2015)

4.2 Confeção e queima dos corpos de prova cerâmicos

Os corpos de prova foram confeccionados, queimados e posteriormente, submetidos a ensaios de absorção de água e resistência à compressão. Também foi calculada a massa específica após a queima, a retração linear e a perda de massa na secagem e na queima. A figura resume a metodologia deste trabalho.

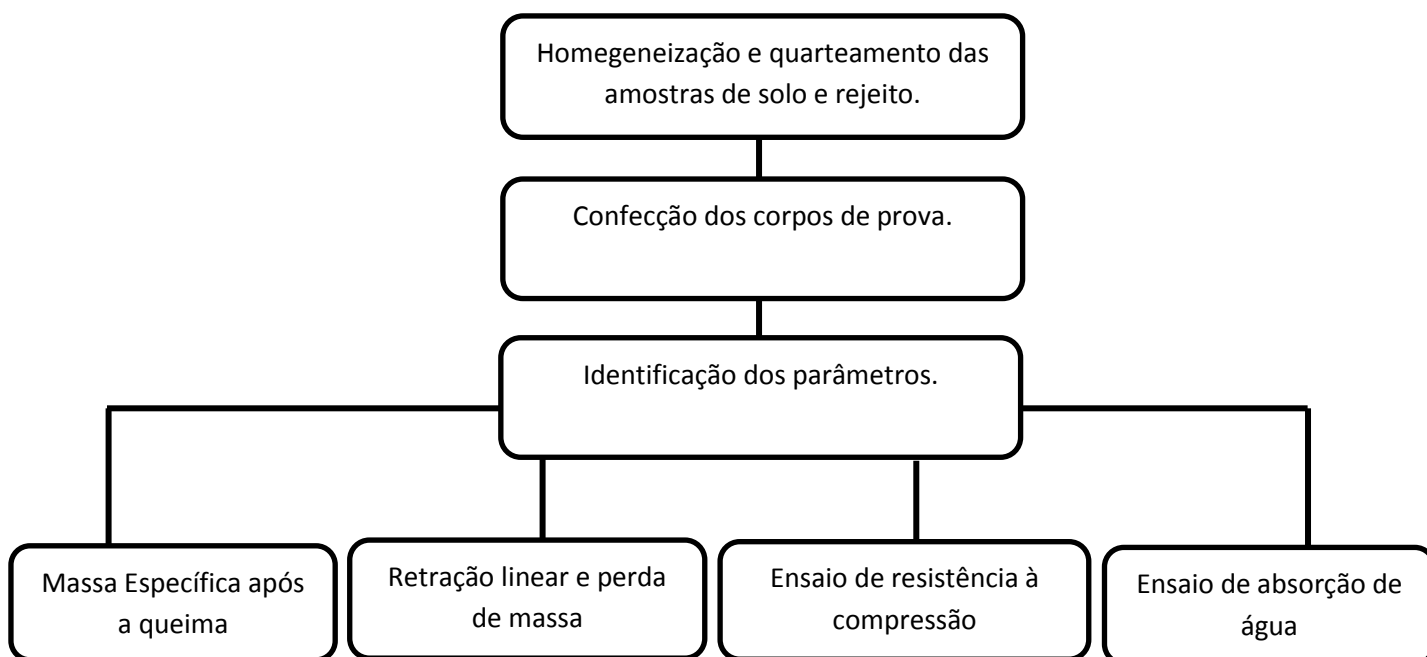


Figura 4.1: Fluxograma da metodologia do trabalho.

As amostras de solo e rejeito foram homogeneizadas e quarteadas pelo método de pilhas cônicas. Foram realizados sucessivos quarteamentos até a obtenção de uma

alíquota suficiente para a confecção dos corpos de prova. O restante das amostras foi arquivado.

Os corpos de prova foram confeccionados no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, utilizando moldes prismáticos, com dimensões de 7x2x1 cm. A substituição de rejeito utilizada para a confecção dos corpos de prova foi de 10% de massa. A confecção dos corpos de prova foi realizada da seguinte maneira:

1. Pesagem dos materiais para a mistura: 3,6g de rejeito e 32,7g de solo.
2. Junção dos dois materiais (solo e rejeito) e medição da umidade da mistura. De acordo com o Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (1986) (apud Paschoal, 2003), a umidade deveria estar entre 8% e 15% para evitar trincas, empenamentos e falhas no preenchimento dos moldes.

A figura 4.2 apresenta as etapas de preparação da amostra para a confecção dos corpos de prova.

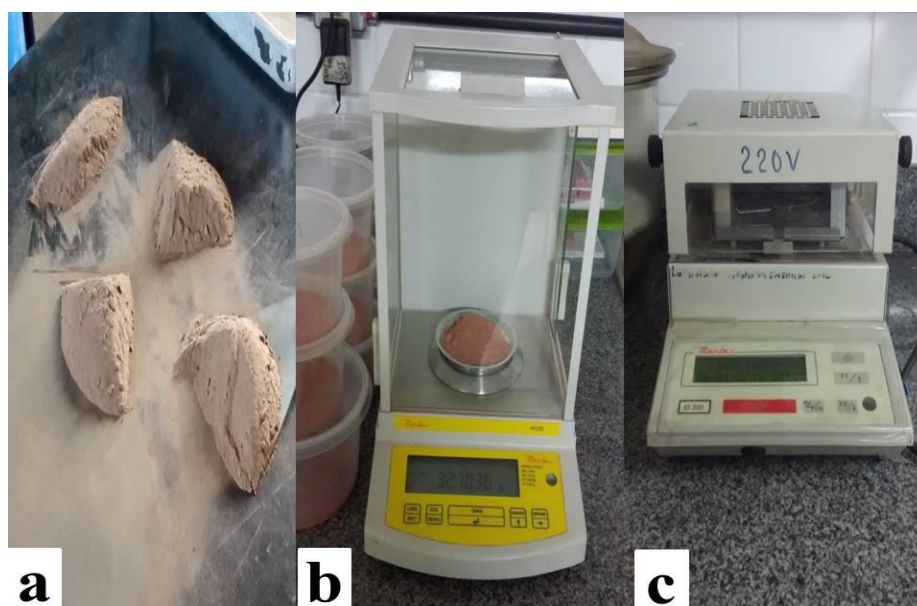


Figura 4.2: Etapas de preparação da amostra para a confecção dos corpos de prova.

Legenda: (a) Quarteamento da amostra de solo argiloso (b) Pesagem das matérias primas para a confecção dos corpos de prova. (c) Medição da umidade da mistura (solo e rejeito).

3. A mistura foi colocada no molde e compactada utilizando a prensa hidráulica com pressão de 21,0 MPa.
4. O corpo de prova foi retirado do molde.

A figura 4.3 mostra as etapas de confecção dos corpos de prova.

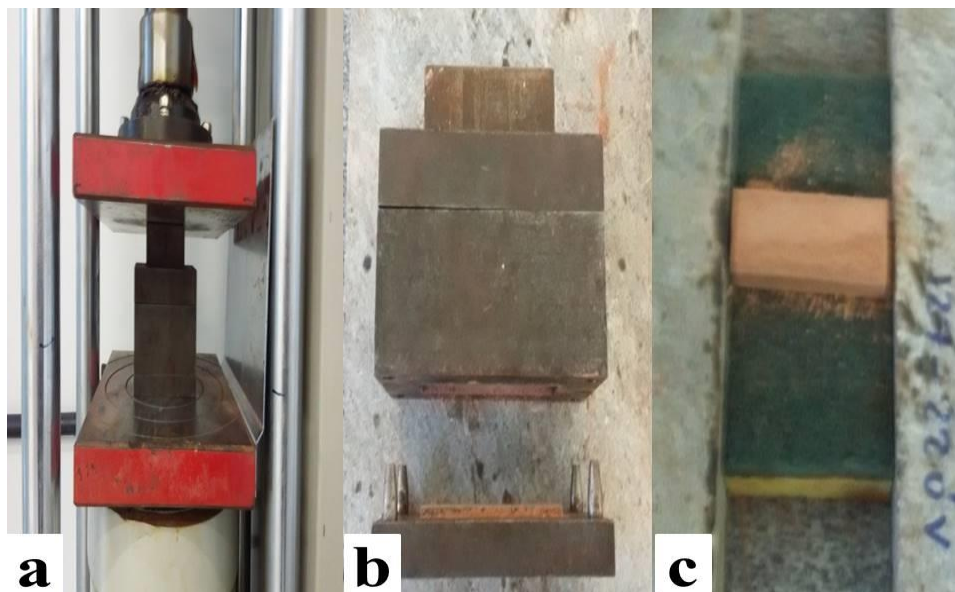


Figura 4.3: Etapas da confecção dos corpos de prova.

Legenda: (a) Compactação do corpo de prova utilizando a prensa hidráulica do corpo de prova
(b) Corpo de prova após a prensagem (c) Corpo de prova após ser retirado do molde.

5. Os corpos de prova foram medidos e pesados.
6. Após a medição, eles foram colocados na estufa e secados por 48 horas a 65°C.
7. Após a secagem, os corpos de prova foram novamente pesados e medidos e colocados na mufla para a queima por 3 horas a 1000°C.
8. Após a queima, os corpos foram novamente pesados e medidos e assim, estavam prontos para a realização dos ensaios de absorção de água e resistência à compressão.

A figura 4.4 mostra as etapas de secagem e queima dos corpos de prova.

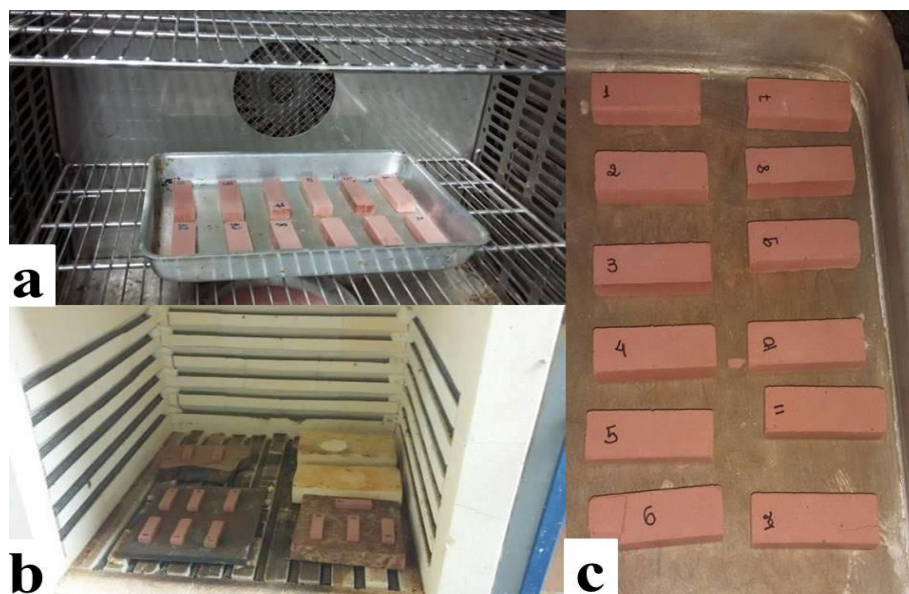


Figura 4.4: Etapas finais da confecção dos corpos de prova.

Legenda: (a) Secagem dos corpos de prova (b) Queima dos corpos de prova (c) Corpos de prova após a queima.

4.3 Ensaios tecnológicos para cerâmica

4.3.1 Retração linear de secagem (RLS)

Para a determinação da RLS, foram medidos os comprimentos dos corpos de prova antes e depois da secagem. O cálculo foi feito a partir da seguinte equação:

$$RLS = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100$$

Onde:

RLS = Retração linear de secagem (%)

L_i = Comprimento do corpo de prova antes da secagem

L_f = Comprimento do corpo de prova após a secagem

4.3.2 Retração linear de queima (RLQ)

Para a determinação da RLQ, foram medidos os comprimentos dos corpos de prova antes e depois da queima. O cálculo foi feito a partir da seguinte equação:

$$RLQ = \frac{L'_i - L'_f}{L'_i} \times 100$$

Onde:

RLQ = Retração linear de queima (%)

$L'i$ = Comprimento do corpo de prova antes da queima

$L'f$ = Comprimento do corpo de prova após a queima

4.3.3 Perda de massa na secagem (PMS)

Para a determinação da PMS, os corpos de prova foram pesados antes e depois da secagem. O cálculo foi feito a partir da seguinte equação:

$$PMS = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100$$

Onde:

PMS = Perda de massa de secagem (%)

M_i = Massa do corpo de prova antes da secagem

M_f = Massa do corpo de prova após a secagem

4.3.4 Perda de massa na queima (PMQ)

Para a determinação da PMQ, os corpos de prova foram pesados antes e depois da queima. O cálculo foi feito a partir da seguinte equação:

$$PMQ = \frac{M'i - M'f}{M'i} \times 100$$

Onde:

PMQ = Perda de massa na queima (%)

$M'i$ = Massa do corpo de prova antes da queima

$M'f$ = Massa do corpo de prova após a queima

4.3.5 Massa específica após a queima (MEQ)

Para a determinação da MEQ, foram medidos a massa e o volume dos corpos de prova após a queima. O cálculo foi feito a partir da seguinte equação:

$$MEQ = \frac{M_q}{V_q}$$

Onde:

MEQ = Massa específica após a queima

M_q = Massa do corpo de prova após a queima

V_q = Volume do corpo de prova após a queima

4.3.6 Ensaio de absorção de água.

O ensaio de absorção de água foi realizado no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Para a realização do ensaio, foram colocadas bolinhas de gude no fundo de uma panela e em seguida, a panela foi preenchida com água destilada. Os corpos de prova foram colocados sobre as bolinhas de gude e a panela foi colocada sobre uma chama. Após a fervura da água, o conjunto continuou sobre a chama por 30 minutos. Depois desse tempo, a chama foi desligada e esperou-se um tempo para o resfriamento. Em seguida, os corpos de prova foram retirados da panela e pesados. A figura 4.5 mostra a realização do teste de absorção.



Figura 4.3.6: Ensaio de absorção de água.

A quantidade de água absorvida pelos corpos de prova foi calculada a partir da fórmula:

$$AA = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100$$

Onde: AA: Porcentagem de absorção de água

P_u: Peso úmido (peso do corpo de prova após a realização do teste)

P_s: Peso seco (peso do corpo de prova antes da realização do teste)

De acordo com a ABNT NBR 15270-1 (2005), o valor máximo de absorção de água para corpos cerâmicos é de 22%.

4.3.7 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência a compressão foi realizado no laboratório de Reologia e Petróleo do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Para a realização do teste, o corpo de prova foi colocado na prensa até que ocorresse a ruptura. Esse valor foi anotado e utilizado para o cálculo. O teste foi realizado em duplicata. A figura 4.6 mostra o corpo de prova antes e depois da realização do teste.



Figura 4.3.7: Corpo de prova antes e depois da realização do teste de compressão.

O valor de resistência à compressão foi calculado a partir da seguinte fórmula:

$$RC = \frac{F \times 10}{A}$$

Onde: RC: Valor de resistência à compressão (Mpa)

F: Força de ruptura do corpo de prova (KN)

A: Área da superfície do corpo de prova submetida à tração da prensa (cm²)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Identificação dos parâmetros dos corpos de prova

5.1.1 Retração linear de secagem (RLS) e retração linear de queima (RLQ)

A tabela 5.1 apresenta os dados de RLS e RLQ dos corpos de prova confeccionados apenas com solo (S) e dos corpos de prova com incorporação de rejeito da concentração de minério de ferro (S+R). O resultado de RLS obtido para os corpos de prova de cerâmica vermelha confeccionados com solo e rejeito foi 0, o que indica que não houve expansão nem retração dos corpos durante a secagem. Já o resultado de RLQ apresentou o valor de 1,96%, o que indica uma pequena retração dos corpos durante a fase de queima. Santos (1989) aponta os valores limites de RLQ para cerâmicas vermelhas. Telhas devem apresentar RLQ menor ou igual a 5%, tijolos furados devem apresentar RLQ menor ou igual a 6% e tijolos de alvenaria não apresentam limitação quanto à RLQ. Sendo assim, pode-se observar que o valor encontrado se apresenta dentro do limite. Vale ressaltar também que os valores de RLS e RLQ dos corpos de prova confeccionados apenas com o solo foi muito próximo dos valores de RLS e RLQ dos corpos de prova com substituição de 10% da massa por rejeito de minério de ferro.

Tabela 5.1: Dados comparativos de RLS e RLQ dos corpos de prova compostos de solo e de solo e rejeito.

Composição	RLS (%)	RLQ (%)
S (Souza <i>et al.</i> , 2016)	-0,12	2,96
S + R	0	1,96

5.1.2 Perda de massa na secagem (PMS) e perda de massa na queima (PMQ)

A tabela 5.2 apresenta os dados de PMS e PMQ dos corpos de prova confeccionados apenas com solo e dos corpos de prova confeccionados com solo e rejeito. O valor de PMS encontrado para os corpos de prova de cerâmica vermelha compostos por solo e rejeito foi de 11,30%, já o valor de PMQ desses corpos de prova foi de 20,64%. Esses valores apresentaram praticamente a mesma variação quando comparados aos valores de PMS e PMQ dos corpos de prova confeccionados apenas com solo. Esses valores

indicam uma diferença na quantidade de água presente nos dois tipos de corpos de prova. Valores menores de perda de massa podem indicar maior quantidade de água presente no corpo de prova.

Tabela 5.2: Dados comparativos de PMS e PMQ dos corpos de prova compostos de solo e de solo e rejeito.

Composição	PMS (%)	PMQ (%)
S (Souza et al., 2016)	8,98	18,92
S + R	11,30	20,64

5.1.3 Massa específica após a queima (MEQ)

O valor encontrado para a MEQ para os corpos de prova de cerâmica vermelha confeccionados com solo e rejeito foi de $1,70\text{g/cm}^3$. Já o valor de massa específica dos corpos de prova confeccionados apenas com solo é de $1,50\text{g/cm}^3$. Podemos observar uma variação entre as duas composições. Segundo Melchiades e colaboradores (2001), a densificação das massas cerâmicas ocorre devido ao fechamento ou até eliminação dos poros durante a fase de queima. Dessa forma, quanto maior a MEQ, menor a quantidade de poros presentes nos corpos cerâmicos, o que influencia diretamente na resistência e na absorção de água do corpo cerâmico. A tabela 5.3 apresenta os dados de MEQ para os corpos de prova confeccionados com as diferentes composições.

Tabela 5.3: Dados comparativos de MEQ dos corpos de prova após a queima para as duas composições.

Composição	MEQ (g/cm^3)
S (Souza et al., 2016)	1,50
S + R	1,70

5.1.4 Ensaio de absorção de água (AA)

A tabela 5.4 apresenta os dados de AA para os corpos de prova confeccionados com solo e rejeito da concentração de minério de ferro e para os corpos de prova confeccionados apenas com solo.

Os valores dos resultados encontrados no teste de absorção de água realizado com os corpos de prova compostos de solo e rejeito de minério de ferro estão acima do que consta na norma ABNT/NBR 15270-3/05 como satisfatórios. De acordo com a ABNT, o valor da AA deve ser no máximo de 22%, porém, o valor encontrado nesse teste foi de 27% para os corpos de prova com substituição de solo por rejeito de minério de ferro.

Percebe-se que tanto os valores encontrados para os corpos de prova confeccionados com solo e rejeito quanto para os corpos de prova confeccionados com solo estão acima da norma. Dessa forma, pode-se observar que o solo utilizado está contribuindo diretamente para esse alto valor de absorção de água, e não a adição de rejeitos.

Tabela 5.4: Dados comparativos de AA dos corpos de prova compostos de solo e de solo e resíduos.

Composição	AA (%)
S (Souza et al., 2016)	26,4
S + R	27,03

5.2.2 Ensaio de resistência à compressão (RC)

A tabela 5.5 apresenta os dados de RC para os dois tipos de corpos de prova. O valor encontrado no teste de Resistência à Compressão (RC) realizado para os corpos de prova de cerâmica vermelha confeccionados com solo e rejeito foi de 42,3MPa. O valor obtido após a realização desse teste para os corpos de prova confeccionados apenas com solo foi de 50,9MPa. Ao realizar a comparação entre esses dois valores, pode-se observar uma diferença de aproximadamente 10% entre eles.

De acordo com o Anuário Brasileiro de Cerâmicas (2000), os limites estabelecidos para a cerâmica vermelha, tratando-se de tijolos maciços, a resistência mecânica deve ser superior a 2,0MPa. Para blocos cerâmicos deve ser igual ou superior a 6,0MPa.

Tabela 5.5: Dados comparativos de RC dos corpos de prova compostos de solo e de solo e resíduos.

Composição	RC (MPa)
S (Souza et al., 2016)	50,9
S + R	42,3

6. CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- **RETRAÇÃO LINEAR**

Os valores de retração linear de secagem e de queima se apresentaram muito pequenos, o que mostra que não houve retração ou expansão dos corpos durante a secagem, e apenas uma pequena retração durante a queima. Os dois valores se apresentam dentro dos valores exigidos pela norma;

- **PERDA DE MASSA**

Os corpos de prova apresentaram os valores de 11,30% e 20,64% para perda de massa de secagem e de queima respectivamente. A perda de massa durante a queima apresentou um valor superior quando comparado à perda de massa durante a secagem, como já era esperado. Os valores de perda de massa podem indicar a quantidade de água presente nos corpos de prova;

- **ABSORÇÃO DE ÁGUA**

O valor encontrado no ensaio de absorção de água foi de 27%. Esse valor se apresenta fora dos padrões para a confecção de alguns tipos de materiais cerâmicos que apresentam exigência máxima de 22%. Porém, pode-se observar que mesmo os corpos de prova confeccionados apenas com solo apresentam valores acima do limite. O que mostra que não foi a adição do rejeito que fez com que os corpos adquiressem essa característica.

- **RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

O ensaio de resistência a compressão apresentou um resultado 42,3MPa. Esse valor está muito acima do valor exigido pela norma, o que mostra uma característica favorável para os corpos de prova confeccionados com essa composição.

Os parâmetros analisados mostram que a confecção de cerâmica vermelha utilizando a mistura solo/rejeito da concentração de minério de ferro se mostrou viável, uma vez que os valores dos parâmetros analisados se mostraram dentro dos limites aceitáveis para a confecção de alguns tipos de materiais cerâmicos. Essa utilização pode proporcionar tanto economia de matéria prima, e consequentemente, produção de materiais cerâmicos mais baratos, quanto o aproveitamento desses rejeitos, diminuindo assim, a quantidade de disposição dos mesmos no meio ambiente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13818/1997.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7170/1983.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15270-1/2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15270-3/2005.

ALVES, J.DAFICO. Materiais de Construção, 6^a.ed. coleção didática n.10- Editora da Universidade Federal de Goiás – 1987.

ANUÁRIO BRASILEIRO DE CERÂMICA VERMELHA, Pólo Produções, ed. J.L. Francisco, Criciúma, SC (2000).

BAUER, L.A. FALCÃO, Materiais de Construção, editora Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro – 1980.

CARGNIN, M.; SOUZA, S.M.A.G. U; SOUZA, A.A. U; A, N.J, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – 2011.

CHEN, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, T. et al. **Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings**. Construction and Building Materials. 2011. V. 25. 2107-2111 p. Departamento Intersindical de estatística de estudos socioeconômicos. Estudo setorial da construção 2011.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - Normas reguladoras de Mineração 2014: http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_18.htm

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente, Inventário Estadual de Barragens do Estado de Minas Gerais – Belo Horizonte – 2010.

FEAM- Fundação Estadual do Meio Ambiente, Plano de Ação para a Adequação Ambiental e Energética da Indústria de Cerâmica Vermelha do Estado de Minas Gerais, 2012.

FERREIRA, W. L. (2013). **Adição de resíduos do setor minero metalúrgico na fabricação de tijolos solo-cal.** Dissertacao (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração, NRM 18- Beneficiamento.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração, relatórios – 2012

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios.** 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 963p.

MELCHIADES, F.G. ROVERI, C. D., SOTÉRIO, J., SILVA, L.L, BOSCHI, A. O. **Controle Dimensional e do Formato de Revestimentos Cerâmicos. Parte I: Dimensões.** Cerâmica Industrial, v. 6. pp 27-33. 2001

MOTTA, J.F.M.; ZANARDO, A; JÚNIOR, M. C., As matérias-primas cerâmicas, Revista Cerâmica Industrial, v. 6, n. 2, 2001.

PATTON, W.J, Materiais de construção civil, 1976, E.P.U.-Editora Pedagógica e Universitária Ltda. São Paulo.

SANTOS, PÉRSIO DE SOUZA. Tecnologia de Argilas. v.1, 1ed. São Paulo, editora EdgardBlucher Ltda, 1975.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de argilas**. 2a Edição, v.1, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, SP. 1989.

QUARESMA, L.F. - Balanço Mineral Brasileiro 2001, Elemento Ferro. DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, DF.

SILVA, F. L. **Aproveitamento e Reciclagem de Resíduos de Concentração de Minério de Ferro na Produção de Paviers e Cerâmica**. 2014. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2014.

SILVA, V. T. **Caracterização de um rejeito de minério de ferro da etapa rougher da separação magnética**. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2015.

YELLISHETTY M., KARPE V., REDDY E. H., et al. **Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: a case study**. Resour Conserv Recycl 2008;52:1283-9.