



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CLARA GIOVANA SOUZA SILVA

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE CERÂMICA
VERMELHA COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

ANANINDEUA

2019

CLARA GIOVANA SOUZA SILVA

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE CERÂMICA
VERMELHA COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Faculdade de Engenharia
de Materiais, da Universidade Federal do
Pará, como requisito para obtenção do
Bacharelado em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dra. Verônica Scarpini
Candido.

ANANINDEUA

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

S586d Silva, Clara Giovana Souza
Determinação das propriedades tecnológicas de
cerâmica vermelha com adição de escória de alto-forno /
Clara Giovana Souza Silva. — 2019.
xi, 51 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Verônica Scarpini Candido
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de
Engenharia de Materiais, Campus Universitário de
Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua,
2019.

1. Cerâmica vermelha. 2. Escória. 3. Resíduo. I.
Título.

CDD 620.14

CLARA GIOVANA SOUZA SILVA

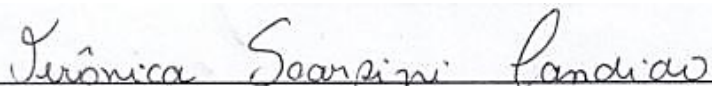
**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE CERÂMICA
VERMELHA COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Faculdade de Engenharia
de Materiais, da Universidade Federal do
Pará, como requisito para obtenção do
Bacharelado em Engenharia de Materiais.

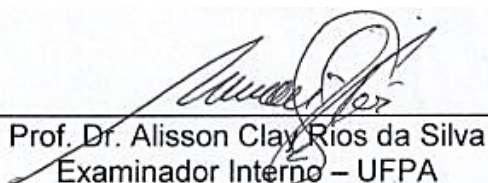
Data da Aprovação: 02 11 2019

Conceito: Excelente

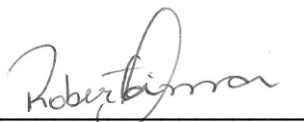
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Verônica Scarpini Candido
Orientadora – UFPA



Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
Examinador Interno – UFPA



Roberta Lima de Souza Costa
Examinador externo – SENAI

Eu dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço aos meus pais Reginaldo e Maria do Carmo pelo apoio nessa graduação, por sempre estarem presentes na minha vida me incentivando, ajudando, chamando atenção e demonstrando que se importam comigo sempre.

Sou eternamente grata a minha família por sempre me incentivar também, meus avós (Vovó Maria, Vovó Rosa e Vovô Bené), tios (Preto e Marcelo), tias (Preta e Bia) e primos, amo muito vocês.

Agradeço, também, aos meus amigos queridos que eu sempre levei no coração pelo companheirismo e carinho comigo.

Aos meus amigos queridos da graduação que sempre estiveram me ajudando a superar as barreiras desse curso, em especial ao FACTH, Rafaela, Diogo, Kadu e Avener.

(F) Ferfa, a gente sempre se estranhou, mas a gente sempre se ajudou e se entendeu, obrigada e é nós.

(A) Amandinha, a gente sempre surtou juntas, mas no final deu tudo certo, te agradeço pela amizade e por fazer mais leve isso tudo.

(T) Thiago, me ajudou MUITO na parte experimental desse TCC, e sempre trouxe risadas e leveza para a turma, vou ser eternamente grata a tua pessoa.

(H) Hellen, vou guardar para sempre na memória o riso seguido do choro e o companheirismo que tu emanas, obrigada.

A professora Verônica Scarpini por me orientar nesse trabalho e estar disposta a me ajudar quando preciso.

A Roberta Lima por estar sempre disposta a me ajudar quando surgia uma dúvida.

Aos laboratórios que fizeram os ensaios apresentados nesse trabalho.

Ao professor Deibson por me ajudar, sem hesitar, sempre que precisei de ajuda.

“Caia sete vezes, levante-se oito”.
(Provérbio japonês)

RESUMO

Com o aumento exponencial da geração de resíduos sólidos industriais e urbanos juntamente a falta de alternativas de descartes ambientalmente corretos aliados a uma indústria com alto potencial de absorver esses resíduos em grandes quantidades sem alterar ou melhorar a qualidade dos produtos, como é o caso da indústria de cerâmica vermelha, motivaram esse trabalho. Portanto, foi estudado a incorporação da escória de alto-forno, um resíduo siderúrgico, em matriz argilosa para a fabricação de cerâmica vermelha. As matérias-primas foram caracterizadas quimicamente (FRX e EDS), mineralogicamente (DRX), termicamente (TG/DTG) e morfológicamente (MEV), posteriormente foram beneficiadas e formadas composições com 5, 10 e 15% em peso de escória incorporada à matriz. Após a formulação, foram confeccionados os corpos de prova e secos a temperatura ambiente e em estufa para, então, serem queimados nas temperaturas de 850, 950 e 1050 °C. Para determinar as propriedades tecnológicas foram feitos os ensaios de absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão. Além disso, as peças queimadas foram caracterizadas por DRX e MEV. Os resultados mostraram que a escória de alto-forno mantém as propriedades da cerâmica sem o resíduo, alcançando sempre valores dentro de normas.

Palavras-chave: Cerâmica vermelha. Escória. Resíduo.

ABSTRACT

With the exponential increase in industrial and urban solid waste generation coupled with the lack of environmentally sound disposal alternatives coupled with an industry with high potential to absorb this waste in large quantities without altering or improving product quality, as is the case with industry. of red ceramic, motivated this work. Therefore, the incorporation of blast furnace slag, a steel waste, into a clay matrix for the manufacture of red ceramic was studied. The raw materials were characterized chemically (XRF and EDS), mineralogically (XRD), thermally (TG/DTG) and morphologically (SEM), and were later formed and compositions with 5, 10 and 15% of slag incorporated into the matrix. After formulation, the specimens were made and dried at room temperature and oven and then burned at 850, 950 and 1050 ° C. To determine the technological properties, the tests of water absorption, apparent porosity, bulk density and bending stress were performed. In addition, the burnt parts were characterized by XRD and SEM. The results showed that blast furnace slag retains the properties of ceramics without the waste, always reaching values within standards.

Keywords: Red ceramic. Slag. Waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.	18
Figura 2 - Produção de cerâmica vermelha nacional por região.	21
Figura 3 - Metodologia de classificação dos resíduos sólidos.	24
Figura 4 - Sistema GALEX.	26
Figura 5 - Argila forte.	28
Figura 6 - Argila fraca.	29
Figura 7 - Fluxograma da metodologia empregada.	30
Figura 8 - MEV de bancada.	32
Figura 9 - Moinho de bolas.	32
Figura 10 - Molde metálico.	33
Figura 11 - Prensa hidráulica.	34
Figura 12 - Corpos de prova conformados.	34
Figura 13 - Corpos de prova após a queima.	35
Figura 14 - Máquina de ensaios universal.	37
Figura 15 - Difratoograma da argila forte.	39
Figura 16 - Difratoograma da argila fraca.	39
Figura 17 - Difratoograma da escória de alto-forno.	40
Figura 18 - TG/DTG da argila forte.	41
Figura 19 - TG/DTG da argila fraca.	41
Figura 20 - TG/DTG da escória de alto-forno.	42
Figura 21 - MEV das argilas. (a) argila forte; (b) argila fraca.	43
Figura 22 - MEV da escória.	43
Figura 23 - Gráfico da porosidade aparente.	44
Figura 24 - Gráfico da massa específica aparente.	44
Figura 25 - Gráfico da absorção de água.	46
Figura 26 - Gráfico de tensão de ruptura em flexão.	47
Figura 27 - Micrografias de cerâmica vermelha queimada a 1050 °C sem adição de escória.	49
Figura 28 - Micrografias de cerâmica vermelha queimada a 1050 °C com 5% de escória adicionada.	50
Figura 29 - Micrografias de cerâmica vermelha queimada a 1050 °C com 10% de escória adicionada.	51
Figura 30 - Micrografias de cerâmica vermelha queimada a 1050 °C com 15% de escória adicionada.	52
Figura 31 - Micrografia da composição sem escória e com 15% de escória lado a lado.	52
Figura 32 - DRX das peças queimadas a 850 °C.	53
Figura 33 - DRX das peças queimadas a 950 °C.	54
Figura 34 - DRX das peças queimadas a 1050 °C.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formulações do trabalho.	33
Tabela 2 – Composição química das matérias-primas.	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. JUSTIFICATIVA	13
3. OBJETIVOS	13
3.1. Objetivo geral	13
3.2. Objetivos específicos	13
4. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	14
4.1. Materiais cerâmicos	14
4.2. Argilas	15
4.2.1. Argilominerais	15
4.2.2. Quartzo	16
4.2.3. Feldspatos	17
4.3. Cerâmica vermelha	17
4.4. Processo de fabricação de cerâmica vermelha.....	18
4.4.1. Preparação da massa.....	18
4.4.2. Conformação das peças	19
4.4.3. Secagem	19
4.4.4. Queima	20
4.5. Indústria de cerâmica vermelha.....	20
4.6. Indústria de cerâmica vermelha no Pará.....	21
4.7. Resíduos sólidos.....	22
4.8. Classificação de resíduos	22
4.9. Escória de alto-forno	25
4.9.1. Resfriamento das escórias	25
4.9.1.1. Resfriamento brusco com água.....	25
4.9.1.2. Resfriamento ao ar	25
4.9.1.3. Resfriamento por processo GALEX	26
4.10. Incorporação de resíduos sólidos em cerâmica vermelha.....	26
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
5.1. Materiais utilizados	28
5.2. Fluxograma dos processos.....	29
5.3. Beneficiamento das matérias primas para caracterização.....	30
5.4. Caracterização das matérias primas	31
5.4.1. Composição química	31

5.4.2.	Difração de raios-x.....	31
5.4.3.	Análises termogravimétricas (TG/DTG).....	31
5.4.4.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	32
5.5.	Beneficiamento das matérias primas para confecção dos corpos de prova	32
5.6.	Formulação das massas.....	33
5.7.	Preparação dos corpos de prova.....	33
5.8.	Secagem	34
5.9.	Queima	35
5.10.	Determinação das propriedades tecnológicas	35
5.10.1.	Porosidade aparente (PA)	35
5.10.2.	Massa específica aparente (MEA).....	36
5.10.3.	Absorção de água (AA)	36
5.10.4.	Flexão em três pontos	36
5.11.	Difração de raios-x.....	37
5.12.	Microscopia eletrônica de varredura.....	37
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6.1.	Composição química	38
6.2.	Difração de raios-x.....	39
6.3.	Análises termogravimétricas (TG/DTG)	41
6.4.	Microscopia eletrônica de varredura.....	42
6.5.	Porosidade aparente e massa específica aparente.....	43
6.6.	Absorção de água	45
6.7.	Flexão em três pontos	47
6.8.	Microscopia eletrônica de varredura.....	48
6.9.	Difração de raios-x.....	53
7.	CONCLUSÃO.....	55
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
9.	REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	57

1. INTRODUÇÃO

Com constante crescimento populacional e industrial o reaproveitamento de resíduos tornou-se uma preocupação mundial. Uma vez que, o destino final dos resíduos sólidos urbanos é um grande problema para a sociedade moderna. Por essa razão, na área acadêmica, a incorporação de resíduos na fabricação de produtos cerâmicos vem sendo estudada amplamente (HEREK *et. al.*, 2009).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), estes resíduos são resultados de atividade industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrições.

Um desses resíduos é a escória de alto-forno, proveniente do processo de fabricação de ferro-gusa. A fusão da ganga do minério de ferro e dos fundentes através de reações químicas formam a escória (BATTAGIN *et al.*, 2002).

Segundo o Centro de Coprodutos Aço Brasil (CCA Brasil), em 2015, cerca de 43% da geração de coprodutos e resíduos do setor siderúrgico foi de escória de alto-forno.

Uma alternativa de destinação final para os resíduos sólidos é a indústria de cerâmica vermelha que consegue suportar um grande volume de resíduo, reduzindo o uso de matérias-primas não renováveis e redução do consumo de energia no processo de fabricação da cerâmica (FARIA, 2015).

A indústria de cerâmica vermelha é uma ótima alternativa, também, por conta da sua produção em larga escala para fomento da construção civil (MENEZES, 2002). Segundo Ramos (2000), o Brasil detém os maiores produtores e consumidores de cerâmica argilosa do mundo.

Considerando o supramencionado, a incorporação de resíduos em cerâmica vermelha tem um enorme potencial de contribuição na solução de problemas ambientais causados pelo despejo inadequado de resíduos provenientes dos mais diversos processos industriais, entre eles a escória de alto-forno, além de economizar matéria-prima e energia no processo de fabricação de peças cerâmicas.

Portanto, esse trabalho tem como objetivo o estudo de cerâmica vermelha incorporada com escória de alto-forno, visando melhorar suas propriedades tecnológicas e propor uma alternativa de descarte apropriada para esse resíduo.

2. JUSTIFICATIVA

Com o processo de industrialização e desenvolvimento de novas tecnologias, a geração de resíduos se tornou algo inerente ao processo produtivo. Diversos tipos de resíduos são produzidos e as formas de descarte por vezes são ineficientes ou inadequadas. A utilização desses materiais como constituintes mássicos em cerâmica vermelha é uma alternativa para descartar sem agredir o ambiente e melhorar as propriedades das peças cerâmicas. Dessa forma justifica-se esse trabalho do ponto de vista ambiental, pois a incorporação da escória de alto-forno em massa cerâmica é uma forma ambientalmente correta de descarte. Além disso, o desenvolvimento de uma tecnologia para reciclagem desse resíduo é altamente benéfico para as empresas geradoras, para as indústrias cerâmicas e, também, para o ambiente. Além disso, destaca-se que são escassos os estudos sobre a escória de alto-forno e sua interação com as massas argilosas para produção de cerâmica vermelha, podendo este estudo, contribuir para geração de dados inéditos acerca das propriedades físicas, químicas, térmicas e mecânicas do resíduo e das peças cerâmicas. Economicamente, esse trabalho se justifica, pois pode contribuir para a diversificação da produção de cerâmica vermelha através do estudo da composição mássica e melhoria das técnicas de produção e processamento.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Avaliar a influência da adição da escória de alto-forno na microestrutura e nas propriedades de cerâmica vermelha.

3.2. Objetivos específicos

- a) realizar a caracterização física, química e microestrutural das matérias-primas e das peças sinterizadas;
- b) produzir corpos de prova com incorporação de 5, 10 e 15% em peso de escória de alto-forno em massa argilosa;

- c) estudar a porosidade aparente, massa específica aparente, a absorção de água e a resistência à flexão;
- d) avaliar a influência da temperatura nas propriedades tecnológicas das cerâmicas sinterizadas a 850, 950 e 1050 °C.

4. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

4.1. Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos, em sua maioria, são compostos formados por elementos metálicos e não metálicos, para os quais as ligações ou são totalmente iônicas ou são predominantemente iônicas, mas com alguma natureza covalente. O termo cerâmica é originário do termo grego *keramikos*, que significa matéria queimada, o que mostra que esses materiais precisam de tratamento térmico, a alta temperatura, para atingirem as propriedades desejáveis (CALLISTER, 2012).

As propriedades dos materiais cerâmicos, assim como as dos outros materiais, dependem de suas estruturas. Entre essas propriedades está a condutividade elétrica baixa, que é consequência da imobilidade dos elétrons das ligações iônicas e covalentes. Os materiais cerâmicos são comumente utilizados como isolantes, dessa forma as suas propriedades dielétricas são importantes. Essas propriedades dielétricas estão ligadas a estrutura dos cristais. As propriedades magnéticas dos materiais cerâmicos dependem do arranjo dos cátions e de seus elétrons não pertencentes à camada de valência. Já as propriedades mecânicas são oriundas das várias combinações de ligações iônicas, covalentes e de van der Waals que existem nas estruturas (VAN VLACK, 1984).

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (2019), materiais cerâmicos são todos os materiais inorgânicos, não metálicos, geralmente obtidos por meio de tratamento térmico.

4.2. Argilas

Segundo Macedo *et al.* (2008) as argilas, no geral, são materiais muito heterogêneos, cujas características dependem da sua formação geológica e da localização da extração.

A argila é um material natural, de textura terrosa, de granulação fina, constituída essencialmente de argilominerais, e que também pode conter outros minerais que não são argilominerais, matéria orgânica e outras impurezas (ABCERAM, 2019 e SANTOS, 1989).

As argilas são a base de materiais estruturais como tijolos, telhas, canos de esgoto e refratários (SHACKELFORD, 2008). Então, entender as características químicas, físicas e mecânicas das argilas é essencial para a obtenção de produtos de qualidade (MOTTA *et al.*, 2002).

Devido à grande variedade de argilas existentes na superfície terrestre existe a enorme gama de produtos cerâmicos com as mais diversas características tecnológicas (FARIA, 2015).

4.2.1. Argilominerais

É devido aos argilominerais que as argilas, na presença de água, desenvolvem propriedades como: plasticidade, tixotropia e viscosidade de suspensões aquosas (ABCERAM, 2019).

Segundo Santos (1989) os principais minerais argilosos presentes nas argilas são a caulinita e montmorilonita.

- a) Caulinita: A caulinita provém de rochas ígneas básicas e ácidas com ausência de cálcio. É formado por empilhamento regular de camadas 1:1 em que cada camada consiste em uma folha de tetraedros SiO_2 e uma folha de octaedros $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ligadas entre si por meio de oxigênios em comum (SANTOS, 1989). Esse argilomineral, quando aquecido em temperaturas crescentes, apresenta uma série de transformações (MARTELLI, 2006).

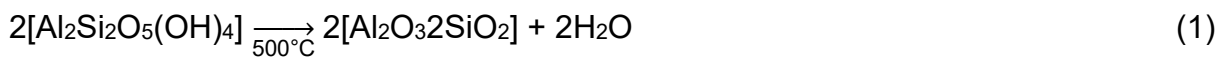
O Quadro 1 mostra o comportamento térmico da caulinita em determinadas temperaturas.

Quadro 1 - Comportamento térmico da caulinita.

Temperatura (°C)	Transformações
Até 200	Eliminação da água superficial
450 a 600	Perda de hidroxilas formando metacaulinita
573	Transformação do quartzo alfa para quartzo beta
980	Formação de espinélios
985 a 1150	Formação de mulita primária
1200	Cristalização da mulita secundária
1300	Formação de cristobalita

Fonte: MARTELLI, 2006.

Santos (1989) afirma que a decomposição térmica da caulinita ocorre segundo a Equação 1:



- b) Montmorilonita: é um mineral do grupo da esmectita constituído por duas folhas de silicato tetraédricas com uma folha central octaédrica unidas por oxigênios em comum. Argilas que são constituídas por esse argilomineral, geralmente, apresenta um elevado grau de plasticidade (SANTOS, 1989).
- c) Illita: esse argilomineral tem uma estrutura parecida com a da montmorilonita, a diferença é que há uma substituição maior de alumínio por silício, o que dá uma maior carga à estrutura cristalina e o cátion neutralizante é o potássio. Tem um espaçamento basal de 10 Å. O alumínio é o cátion octaédrico dominante, mas o ferro e o magnésio podem estar presentes. O argilomineral pode ser dioctaédrico ou trioctaédrico (SANTOS, 1989).

4.2.2. Quartzo

O quartzo é uma das formas cristalinas da sílica juntamente com a cristobalita e tridimita (ABECERAM, 2019). A sílica é um composto cerâmico, de estequiometria XM_2 , fundamental para uma gama de produtos cerâmicos e vidros (SHACKELFORD, 2008).

O quartzo aumenta a refratariedade da argila e diminui a retração de queima, ou seja, é responsável pelo controle dimensional das peças cerâmicas (SÁNCHEZ et

al., 1997). Ele age como material inerte, na etapa de queima, sendo envolto pela fase líquida formada aumentando a resistência mecânica da cerâmica (Betini, 2007; Guimarães, 2017).

Entretanto, o quartzo em teores elevados e com granulometria grosseira tende a ter efeitos contrários aos supracitados (OSHIMOTO *et al.*, 1990).

4.2.3. Feldspatos

O termo feldspato abrange uma série de aluminossilicatos alcalinos ou alcalinos terrosos. Para a indústria cerâmica os feldspatos mais importantes são o potássico e o sódico por se comportarem como fundentes. Os fundentes são materiais que atuam na redução da temperatura de sinterização e a porosidade do produto cerâmico aumentando, assim, a sua resistência mecânica (ABCERAM, 2019).

A atuação dos feldspatos durante a sinterização dependerá do tamanho de suas partículas e da temperatura de sinterização (GUIMARÃES, 2017).

4.3. Cerâmica vermelha

Conforme a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2019), cerâmica vermelha são os materiais de coloração avermelhada utilizados na construção civil (tijolos, telhas, blocos, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas), e também utensílios de utilização doméstica e de adorno. No caso das lajotas, muitas vezes são classificadas nesse grupo, entretanto, é mais correto dizer que são materiais de revestimento.

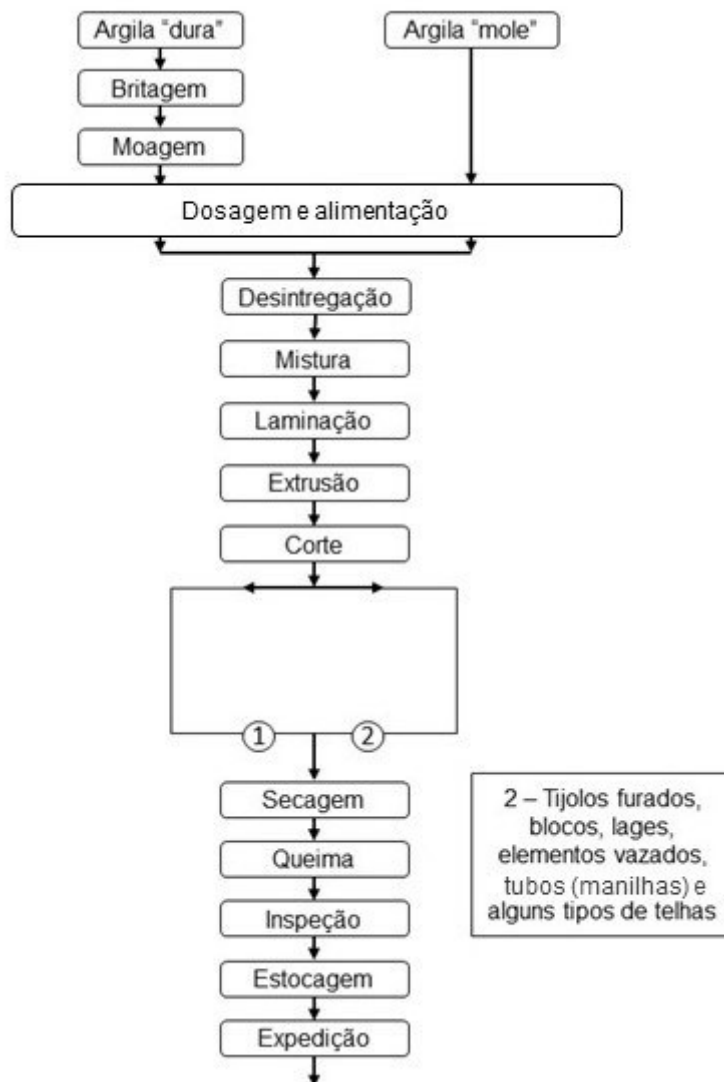
O setor de cerâmica vermelha tolera a adição de materiais alternativos, considerando a capacidade de troca catiônica das argilas, por isso é importante o estudo de resíduos gerados por indústrias reciclados em cerâmica vermelha (CALDAS, 2012).

4.4. Processo de fabricação de cerâmica vermelha

De acordo com a ABCERAM (2019), após a mineração das matérias-primas, os materiais devem ser beneficiados. O processo de fabricação tem início somente após o beneficiamento.

A Figura 1 mostra um fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.

Figura 1 - Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.



Fonte: ABCERAM, 2019.

4.4.1. Preparação da massa

Conforme a ABCERAM (2019) os materiais cerâmicos, geralmente, são compostos por 2 ou mais matérias-primas, por isso a importância da dosagem, que

deve seguir rigorosamente as formulações estabelecidas das massas. De um modo geral, as massas podem ser classificadas em:

- a) Suspensão – para obter peças em moldes de gesso ou resinas porosas.
- b) Massas secas ou semi-secas (granulada) – para obter peças por prensagem.
- c) Massas plásticas – para obter peças por extrusão, seguida ou não de torneamento ou prensagem.

A composição ideal de uma massa cerâmica exige fusibilidade e plasticidade, com a finalidade de fornecer trabalhabilidade e resistência mecânica de queima (CALDAS, 2012).

4.4.2. Conformação das peças

É denominada de conformação a etapa que dá forma a peça. Os tipos de conformação de cerâmica vermelha são: extrusão e prensagem (CALDAS, 2012; MAIA, 2012).

- a) Extrusão: é muito utilizado na indústria cerâmica e permite a aplicação de qualquer tipo de matéria-prima com plasticidade natural ou adquirida pela adição de plastificantes (VICENZI, 1999). Consiste em forçar a massa cerâmica em uma matriz, com o auxílio de um êmbolo ou parafuso (BOCH E NIÈPCE, 2007).
- b) Prensagem: As partículas das matérias-primas são compactadas e moldadas por meio de uma pressão exercida dentro de uma matriz, buscando uma alta densificação (OLIVEIRA E HOTZA, 2015; REED, 1995).

4.4.3. Secagem

É a etapa onde a água utilizada na conformação é retirada de maneira uniforme, lenta e controlada com a finalidade de evitar a formação de defeitos, já que o corpo cerâmico conserva de 5 a 35% de água após a conformação (NORTON, 1973).

Os processos de secagem de produtos cerâmicos são: natural, de forno, artificial, de câmara e de túnel.

Após a secagem o produto adquire resistência mecânica que possibilita a sua manipulação até a queima (SOARES *et al.*, 2004).

4.4.4. Queima

É a finalização do processo de fabricação da cerâmica, tem o foco de oferecer a condição para as transformações químicas e físicas dos componentes adquirindo, assim, as propriedades desejadas como uma elevada resistência (KINGERY *et al.*, 1976; BOCH E NIÈCPE, 2007).

O Quadro 2 apresenta algumas transformações químicas e físicas que ocorrem durante o processo de queima.

Quadro 2 - Transformações nas argilas.

Temperaturas (°C)	Transformações
Até 150	Eliminação da água livre
Até 200	Eliminação da água coloidal
Aproximadamente 280	Desidroxilação da gibbsita
350 a 650	Combustão de substâncias orgânicas e dissociação de sulfetos
450 a 650	Decomposição dos minerais da argila com perda da água de constituição
Aproximadamente 570	Transformação do quartzo alfa para quartzo beta
700	Início das reações sílica-alumina com fundentes
800 a 950	Decomposição dos carbonatos liberando CO ₂
Acima de 1000	Amolecimento e fusão dos silicoaluminatos com formação de fase vítrea

Fonte: COSTA, 2018; GUIMARÃES, 2017.

4.5. Indústria de cerâmica vermelha

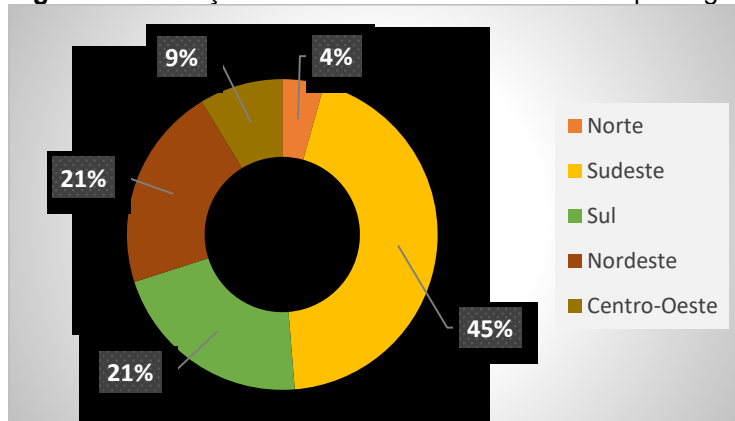
De acordo com a ANICER (2014) no ano de 2014 a indústria de cerâmica vermelha no Brasil faturava cerca de R\$ 18 bilhões/ano e era composta por 6.903 empresas.

O setor de telhas, blocos e tubos cerâmicos é o maior fornecedor de materiais para edificações, saneamento e coberturas no Brasil. Além de representar 4,8% da indústria da Construção Civil, o segmento fornece quase de 300 mil empregos diretos e 900 mil indiretos (ANICER, 2019).

É perceptível que essas empresas movimentam milhões de toneladas de matérias-primas e faturam valores anuais altíssimos superiores a outros segmentos cerâmicos (DUALIBI *et al.*, 2002).

Entre as regiões as que tem destaque na produção nacional de cerâmica vermelha são as regiões sul e sudeste (ANICER, 2015). A Figura 2 mostra o percentual de produção nas regiões brasileiras.

Figura 2 - Produção de cerâmica vermelha nacional por região.



Fonte: Adaptado de ANICER, 2015.

4.6. Indústria de cerâmica vermelha no Pará

O estado do Pará é o estado da região norte que possui o maior número de empresas no ramo da cerâmica vermelha. Até 2014 o Pará contava com aproximadamente 200 empresas cadastradas e gerando por volta de 15 mil empregos diretos e 40 mil indiretos (MAGNO, 2014). Destaca-se na atividade o município de São Miguel do Guamá, localizado na região nordeste do estado.

O polo cerâmico de São Miguel do Guamá tem enorme contribuição para com o PIB do município e a geração de empregos. É uma contribuição significativa na esfera socioeconômica do nordeste paraense (CORDOVIL, 2010).

Entretanto, a indústria cerâmica no Pará limita-se a produção de cerâmica estrutural, ou seja, somente telhas e tijolos (BETINI, 2007).

4.7. Resíduos sólidos

Resíduo é qualquer tipo de material que é descartado após uma ação ou processos produtivos (SOARES, 2015). De acordo com Vieira *et al.*, (2006) a definição de resíduo varia com o tempo e o espaço; no momento que lhe é dado um valor, um material deixa de ser considerado um resíduo.

A norma da ABNT 10004:2004 diz que resíduos sólidos são materiais, no estado sólido e semi-sólido, provenientes de ambiente industrial, doméstico, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Também fazem parte dessa definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, igualmente os gerados em equipamentos e instalações do controle de poluição, e determinados líquidos cujas características tornem inviáveis o seu descarte na rede pública de esgoto ou corpos de água, e precisem de soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT 10004, 2004).

Estes resíduos são uma preocupação mundial crescente, por conta do seu grande volume e da sua destinação final que ocasiona custos e degrada o meio ambiente, quando colocados em lugares inapropriados como lixões, aterros sanitários, causando a degradação do solo, lençóis freáticos, mananciais e o ar (VITORINO *et al.*, 2009).

4.8. Classificação de resíduos

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 10004 (2004) os resíduos sólidos são classificados quanto a periculosidade ao meio ambiente e saúde pública em:

- a) Resíduos classe I – perigosos: os resíduos perigosos são aqueles que apresentam periculosidade em razão da presença de alguma das características seguintes: inflamabilidade, reatividade, corrosividade, toxicidade ou patogenicidade.
- b) Resíduos classe II – Não perigosos: não são perigosos e estão subdivididos em: Classe II A e Classe II B.

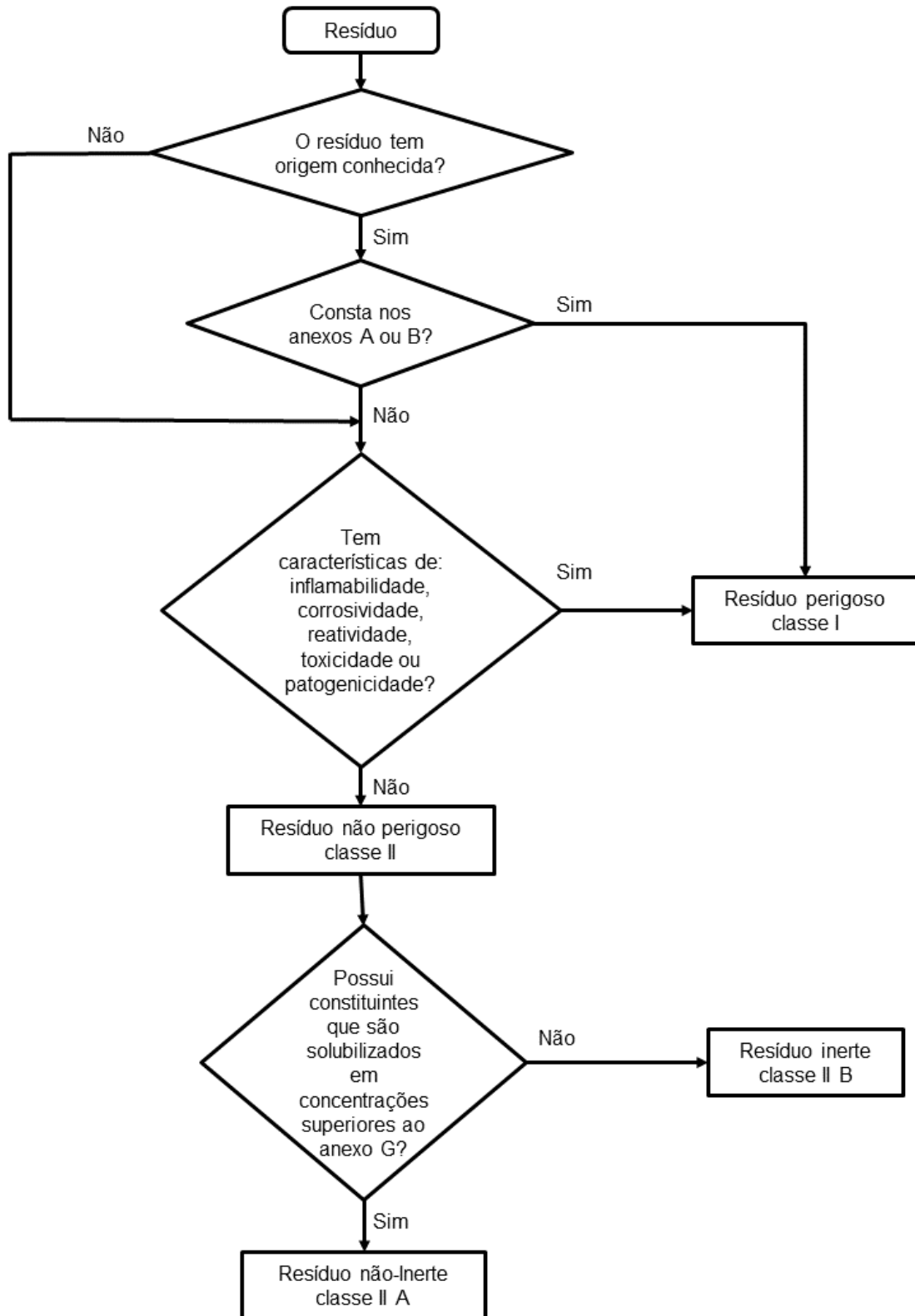
- c) Resíduos classe II A – Não inertes: são resíduos que podem ser biodegradáveis, combustíveis e solúveis em água.
- d) Resíduos classe II B – Inertes: são resíduos que seus componentes são insolúveis, à temperatura ambiente, em concentrações superiores aos padrões de portabilidade da água.

Se o resíduo não for enquadrado em nenhuma das classes anteriores, testes laboratoriais deverão ser realizados para a avaliação da concentração de substâncias que oferecem periculosidade.

Para a realização dos ensaios devem ser consultadas as seguintes normas:

- **ABNT 10005/2004** – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Estabelece os critérios para a realização de ensaio de lixiviação, retirada de substâncias por meio de percolação.
- **ABNT 10006/2004** – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos: designa critérios para realizar o ensaio de solubilização, com a finalidade de avaliar a concentração dos elementos contidos por meio de uma amostra solubilizada.
- **ABNT 10007/2004** – Amostragem dos resíduos sólidos: prescreve critérios de coleta e amostragem de resíduos.

A Figura 3 ilustra a metodologia de classificação dos resíduos sólidos quanto periculosidade ao ambiente e a saúde pública.

Figura 3 - Metodologia de classificação dos resíduos sólidos.

Fonte: ABNT, 2004.

4.9. Escória de alto-forno

A escória, segundo Bittencourt (1992), é formada pela fusão entre um ou mais compostos presente nos processos pirometalúrgicos e fica segregada da fase metálica por conta da sua insolubilidade e densidade.

A NBR 5019 (2001) define a escória como sendo líquida e pastosa produzida durante processos pirometalúrgicos que se torna sólida à temperatura ambiente.

4.9.1. Resfriamento das escórias

A escória pode obter diferentes características como densidades e granulometrias, dependendo do seu tipo de resfriamento. São eles: brusco com água, ao ar e pelo processo GALEX (ALMEIDA, 2014; KELES, 2011).

4.9.1.1. Resfriamento brusco com água

A escória é levada aos granuladores sendo resfriada por jatos d'água com pressão de 0,6MPa. Nesse processo a escória é resfriada bruscamente e se solidifica rapidamente com tempo insuficiente para formação de núcleos cristalinos, mantendo sua característica de hidraulicidade (ARCELOR MITTAL, 2019; ALMEIDA, 2014; SILVA, 2005).

Quanto maior a rapidez do resfriamento maior será o grau de vitrificação da escória e seu potencial hidráulico facilitando a sua utilização em agregados miúdo e graúdo, tijolos, argamassas e blocos de vedação vertical (SILVA, 2005).

4.9.1.2. Resfriamento ao ar

A escória é vazada, líquida, em pátios apropriados, onde são resfriadas em contato com o ar (ARCELOR MITTAL, 2019). Dando origem a um produto maciço e cristalizado (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A escória resfriada ao ar possui natureza vesicular e áspera, possui boa resistência à líquidos corrosivos, ações climáticas e mudanças de temperatura bruscas. Além disso, possui dureza e resistência à abrasão que permite-lhe competir com outros agregados como: graúdo em concreto, bases de estrada e pavimentações asfálticas (ALMEIDA, 2014).

4.9.1.3. Resfriamento por processo GALEX

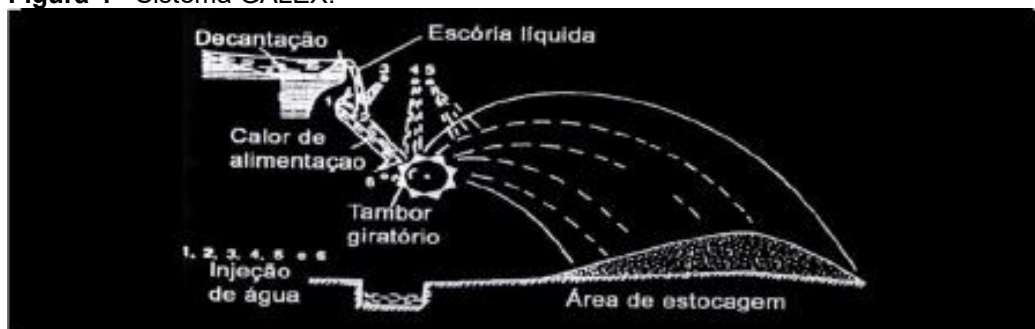
O método GALEX, consiste na queda da escória, ainda líquida, em um cilindro dentado giratório que é refrigerado por jatos de água fria.

Produz a escória peletizada. É uma escória diferenciada, com a superfície do grão com estrutura vítrea, pois é resfriada rapidamente quando entra em contato com as gotas de água, e o interior cristalino, pois é resfriado mais lentamente (MALHOTRA, 1987).

Apresenta granulometria de agregado graúdo e massa específica que varia de $0,6 \text{ g.cm}^{-3}$ a $0,9 \text{ g.cm}^{-3}$ são essas características que favorecem a aplicabilidade dessa escória em concretos leves, enchimento de pavimentação e blocos de concreto para fins estruturais ou não (SILVA, 2005).

A Figura 4 ilustra o sistema de resfriamento GALEX.

Figura 4 - Sistema GALEX.



Fonte: Silva, 2005.

4.10. Incorporação de resíduos sólidos em cerâmica vermelha

A prática da incorporação de resíduos sólidos dos mais variados setores industriais em argila, para a fabricação de produtos de cerâmica vermelha, tem sido

amplamente estudada no meio científico, por ser uma alternativa de destinação ambientalmente correta para esses resíduos, e ainda inertizar seus elementos potencialmente tóxicos na etapa da queima (DONDI *et al.*, 1997).

Além de contribuir com o meio ambiente, outro aspecto benéfico da incorporação de resíduos em cerâmica vermelha é o fato de que a composição da massa argilosa pode tolerar diversos tipos de resíduos, além de suportar altos teores do mesmo. O que contribui na economia de matéria-prima, reduzindo a quantidade de argila gasta, tornando mais duradouro esse recurso natural (JONKER E POTGIETER, 2005).

Além disso os resíduos podem melhorar o processamento cerâmico, a qualidade da cerâmica e, ainda, contribuir para a redução do consumo energético na etapa de sinterização (VITORINO *et al.*, 2009).

Isso mostra que o setor de cerâmica vermelha tem um enorme potencial de contribuição na solução de problemas ambientais provenientes dos mais diversos processos industriais.

Costa (2018), Faria (2015), Caldas (2012), Candido (2012) e Soares (2016) foram alguns autores que estudaram as propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com diferentes tipos de resíduos.

Costa (2018) fez a incorporação de lama de alto-forno, resíduo siderúrgico, em matriz cerâmica para a fabricação de telhas e encontrou resultados de flexão e retração linear de queima dentro dos exigidos por norma em todas as composições estudadas. No ensaio de absorção de água as composições ficaram dentro dos exigidos por norma, com exceção da queima de 850 °C.

Faria (2015) adicionou pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha e atingiu valores exigidos por norma (2 Mpa) nas queimas de 850 e 950 °C para tijolos maciços provando que há benefícios na incorporação desse resíduo em cerâmica vermelha.

Caldas (2012) reciclou resíduo de vidro em cerâmica vermelha e alcançou resultados excelentes nos testes físicos e mecânicos. A composição com 20% de vidro plano teve destaque nesse estudo pois foi o maior percentual de resíduo incorporado a massa e que obteve melhores resultados.

Candido (2012) incorporou chamote em matriz cerâmica para a produção de adoquim. Todas as composições que foram estudadas nesse trabalho ficaram dentro dos valores exigidos por normas para a fabricação do adoquim cerâmico.

Soares (2016) adicionou resíduo proveniente de ETE de uma indústria têxtil em cerâmica vermelha e concluiu que a adição de até 10% de lodo na matriz cerâmica em temperaturas de queima entre 850 °C e 900 °C podem ter aplicação na indústria.

Então, visto que a incorporação de resíduos em cerâmica vermelha foi benéfica em muitos estudos e, tem enorme potencial na reciclagem de resíduos sólidos, gerados em enorme quantidade, é importante estudar a adição de escória de alto forno, pois esse material pode contribuir com um menor gasto energético na etapa de queima, além de poder melhorar as propriedades tecnológicas da cerâmica e contribuir com a minimização do descarte inadequado desse resíduo.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Materiais utilizados

As matérias primas utilizadas nesse trabalho foram: argila forte (mais plástica) e fraca (menos plástica), mostradas nas figuras 5 e 6, respectivamente, provenientes do município de São Miguel do Guamá da Cerâmica Menegalli.

Figura 5 - Argila forte.



Fonte: Autora.

Figura 6 - Argila fraca.



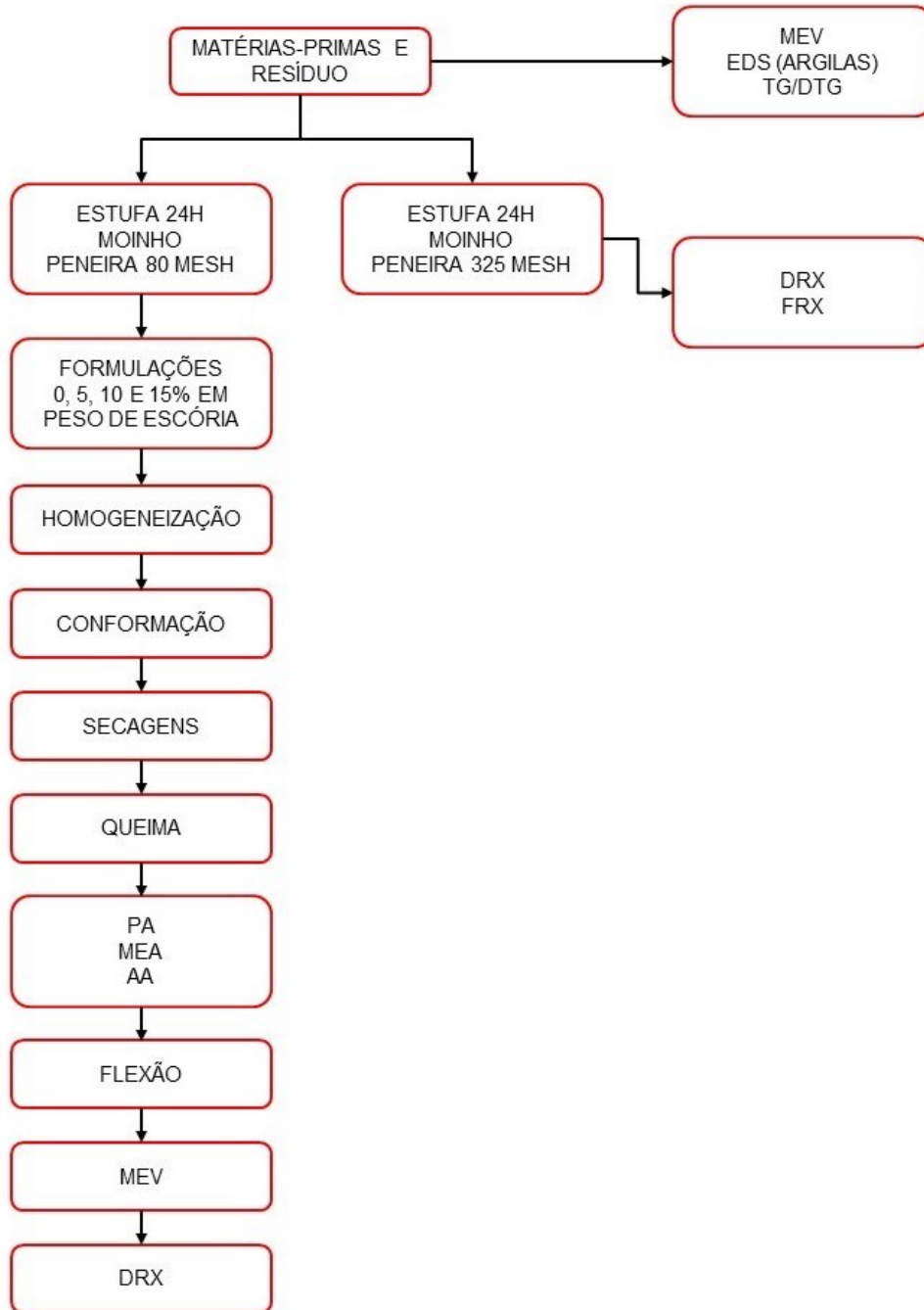
Fonte: Autora.

Foi utilizada também a escória de alto-forno original de uma siderúrgica no sudeste paraense.

5.2. Fluxograma dos processos

O fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho é mostrado na figura 7.

Figura 7 - Fluxograma da metodologia empregada.



Fonte: Autora.

5.3. Beneficiamento das matérias-primas e do resíduo para caracterização

As matérias-primas e a escória foram secas em estufa a ± 105 °C durante 24 horas e, posteriormente, desagregadas em moinho de bolas por 30 minutos. Após a passagem pelo moinho de bolas os materiais foram peneirados em peneira de 325 mesh (0,044 mm).

5.4. Caracterização das matérias-primas

5.4.1. Composição química

A fluorescência de raios-x da escória de alto-forno foi realizada em espectrofotômetro de fluorescência de raios-x Axios Minerals da PANalytical do laboratório de Geociências da UFPA.

A composição química das argilas foi identificada por meio de EDS no Laboratório de Pesquisa e Análise de Combustível – LaPAC da UFPA.

5.4.2. Difração de raios-x

As difratometrias de raios-x das argilas foram realizadas no laboratório de Eco compósitos da Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Pará. O difratômetro utilizado é da marca Bruker, modelo D2- Phaser, operando a 30 kV e 10 mA e com comprimento de onda $\lambda_{CuK\alpha}=1,5406\text{Å}$. As amostras foram examinadas em um intervalo de 2θ entre 0 e 60° , a uma taxa de varredura de $8^\circ/\text{min}$.

A difração de raios-x da escória de alto-forno foi realizada no laboratório de caracterização mineral (LCM) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará. Foi utilizado um difratômetro Empyrean, da marca PANalytical, com Goniômetro θ - θ com tubo de raios-x cerâmico de ânodo de Co ($K\alpha=1,78901\text{Å}$), foco fino longo de 1800W e filtro $k\beta$ de Fe. O detector utilizado é de área, do tipo PIXel^{3D} 2x2, com varredura em modo linear (1D), comprimento ativo $3,3473^\circ 2\theta$, número de canais ativos=255.

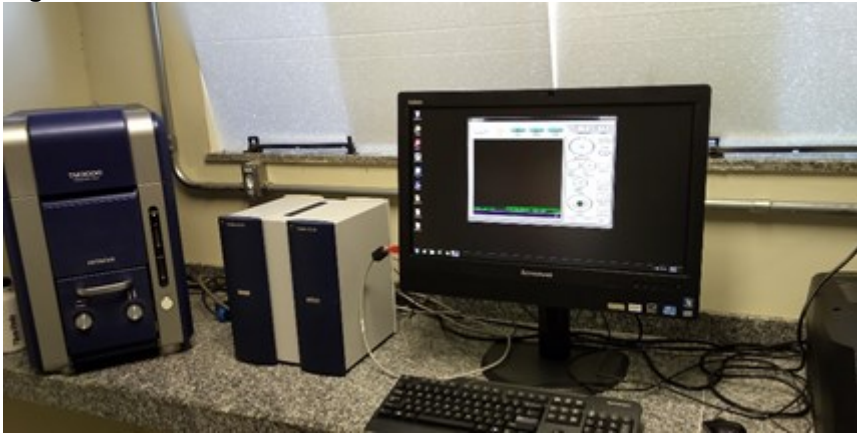
5.4.3. Análises termogravimétricas (TG/DTG)

As análises termogravimétricas das matérias-primas e do resíduo foram feitas em analisador térmico simultâneo de modelo STA 449 F3 da marca NETZSCH, com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.

5.4.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As microscopias eletrônicas de varredura dos materiais foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura de bancada HITACHI modelo TM 3000 mostrado na Figura 8.

Figura 8 - MEV de bancada.



Fonte: Queiroz, 2019.

5.5. Beneficiamento das matérias primas para confecção dos corpos de prova

As argilas e o resíduo foram secos em estufa de modelo DIMATE à ± 105 °C por 24 horas. Após a secagem os materiais foram desagregados em moinho de bolas (Figura 9) durante 30 minutos. Posteriormente, as matérias-primas e o resíduo foram passados em peneira de 80 mesh com abertura de 0,177 mm.

Figura 9 - Moinho de bolas.



Fonte: Autora.

5.6. Formulação das massas

As massas foram preparadas com as argilas e 5, 10 e 15% em peso de resíduo adicionado a massa argilosa. As formulações foram homogeneizadas em moinho de bolas durante 30 minutos.

A Tabela 1 apresenta o percentual em peso de cada matéria prima nas formulações e o número de corpos de prova a ser produzidos.

Tabela 1 - Formulações do trabalho.

Composições (%)	Argila Forte (%)	Argila Fraca (%)	Escória (%)	Nº de CP
0	50	50	0	30
5	47,5	47,5	5	30
10	45	45	10	30
15	42,5	42,5	15	30

Fonte: Autora.

5.7. Preparação dos corpos de prova

As massas foram umedecidas com 8% em peso de água. Posteriormente, foram confeccionados corpos de prova com 80g de massa em molde metálico retangular (Figura 10) com dimensões de aproximadamente 10 x 5 x 1 cm, conforme exigido pela NBR 5738/2015. Para a compactação dos CP foi utilizada uma prensa hidráulica manual (Figura 11) Karl Kolb scientific technical supplies D-6070 com uma força de 100 kN.

Figura 10 - Molde metálico.



Fonte: autora

Figura 11 - Prensa hidráulica.



Fonte: Autora

A Figura 12 apresenta alguns corpos de prova após a conformação.

Figura 12 - Corpos de prova conformados.



Fonte: Autora

5.8. Secagem

Após a confecção, os corpos de prova secaram à temperatura ambiente durante 24 horas e, em seguida, foram levados a estufa e permaneceram por 24 horas a ± 105 °C.

5.9. Queima

Posteriormente a secagem, os CP foram queimados nas temperaturas de 850, 950 e 1050 °C em forno do tipo mufla a uma taxa de aquecimento de 3 °C.min⁻¹ e mantidos em temperatura de patamar por 2 horas. O resfriamento ocorreu por desligamento do forno.

A Figura 13 mostra os corpos de prova após a queima.

Figura 13 - Corpos de prova após a queima.



Fonte: Autora

5.10. Determinação das propriedades tecnológicas

5.10.1. Porosidade aparente (PA)

Para a determinação da porosidade aparente, segundo a ASTM C373-88 (2006), os corpos de prova foram pesados secos (M_s) e, em seguida, imersos em água fervente durante 2 horas, posteriormente, os corpos de prova foram pesados submersos em água (M_i) por meio de um aparato de metal conectado à balança digital. Para a determinação da massa úmida foi retirado o excesso de água dos CP (M_u).

A porosidade aparente é determinada por meio da Equação 2:

$$PA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 (\%) \quad (2)$$

5.10.2. Massa específica aparente (MEA)

A massa específica aparente foi calculada seguindo a ASTM C373-88 (2006). Utilizando a Equação 3:

$$MEA = \frac{M}{V} \quad (3)$$

MEA=Massa Específica Aparente do corpo de prova seco ou queimado;

M=massa do corpo de prova (g)

V=volume do corpo de prova (cm³)

5.10.3. Absorção de água (AA)

O ensaio para determinar a absorção de água foi realizado conforme as diretrizes da ASTM C373-88 (ASTM, 2006) determinada pela Equação 4:

$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \text{ (\%)} \quad (4)$$

AA=Absorção de água (%);

M_u=Massa do corpo de prova úmido (g);

M_s=Massa do corpo de prova seco (g).

5.10.4. Flexão em três pontos

O ensaio de flexão em três pontos foi realizado conforme as diretrizes da norma ASTM C674-77 (ASTM, 1977) em máquina universal de ensaios AROTEC, mostrada na Figura 14. A resistência a flexão em três pontos é expressa pela Equação 5:

$$TRF \text{ (MPa)} = \frac{3P.L}{2bh^2} \quad (5)$$

TRF=Tensão de ruptura em flexão (MPa)

P=Carga atingida no momento da ruptura (N)

L=Distância entre os apoios (mm)

b =Largura do corpo de prova (mm)

h =Altura do corpo de prova (mm)

Figura 14 - Máquina de ensaios universal.



Fonte: Autora.

5.11. Difração de raios-x

A difração de raios-x das peças queimadas foi realizada seguindo os parâmetros da caracterização da escória de alto forno, descrito no subtópico 5.4.2.

5.12. Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura dos materiais foi realizada em microscópio eletrônico de varredura de bancada HITACHI modelo TM 3000 (Figura 8).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Composição química

A tabela 2 mostra a composição química das argilas e da escória de alto-forno obtidas por meio de EDS e FRX.

Tabela 2 – Composição química das matérias-primas.

Componentes	Argila Forte (% em peso)	Argila Fraca (% em peso)	Escória (% em peso)
SiO₂	46,42	62,8	20,70
Al₂O₃	27,90	21,5	6,38
Fe₂O₃	4,23	4,56	20,10
TiO₂	1,30	1,07	0,52
MnO	0,11	-	1,84
MgO	0,72	0,23	4,83
CaO	0,21	0,02	26,7
K₂O	3,67	0,07	0,48
SO₃	-	-	0,46
ZnO	-	-	0,58
Cr₂O₃	-	-	0,15
Perda ao fogo	11,96	9,89	16,94

Fonte: Autora.

Como mostrado na tabela 2, é notável um alto teor de SiO₂ que ajuda no controle dimensional de peças cerâmicas, e um baixo teor de óxidos fundentes nas argilas. O resíduo apresenta uma alta concentração de ferro, cálcio e sílica e, também, a presença de fundentes em quantidades consideráveis.

O alumínio existente nas argilas está, em sua maior parte, combinado formando os argilominerais, comumente a caulinita (SANTOS, 1989).

O ferro é responsável, principalmente, pela coloração da cerâmica e redução da refratariedade (SANTOS, 1989).

Os óxidos de cálcio, magnésio, sódio e potássio são agentes fundentes, portanto tendem a baixar a refratariedade das argilas, entretanto a escassez desses

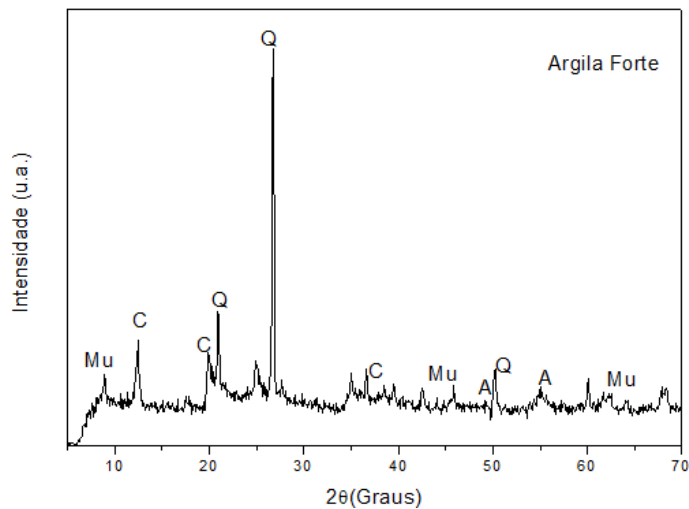
óxidos dificulta a formação de fase vítrea, necessária para uma maior densificação das peças cerâmicas (CANDIDO, 2012; SANTOS, 1989).

A perda ao fogo é consequência, principalmente, da retirada de água intercalada, água de hidroxilas dos argilominerais oxidação de matéria orgânica e desidratação de óxidos (CANDIDO, 2012; SANTOS, 1989).

6.2. Difração de raios-x

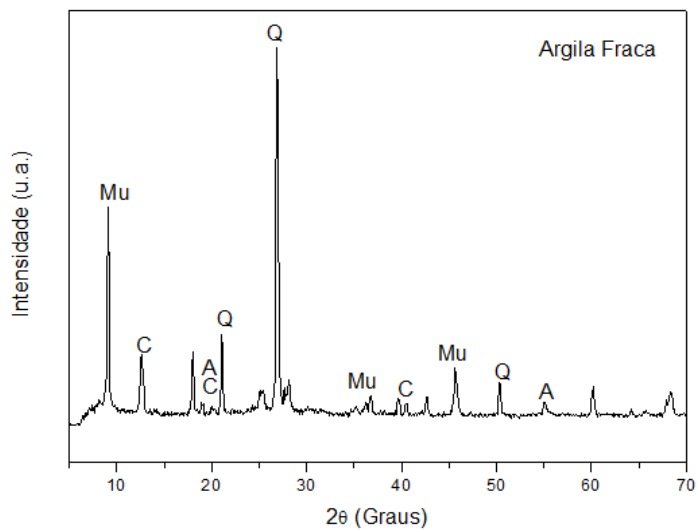
A figura 15, 16 e 17 apresenta o resultado das difrações de raios-X das argilas e da escória, respectivamente.

Figura 15 - Difratoograma da argila forte. C: caulinita, Q: quartzo, Mu: mica muscovita e A: anatásio.



Fonte: Autora.

Figura 16 - Difratoograma da argila fraca. C: caulinita, Q: quartzo, Mu: mica muscovita e A: anatásio.



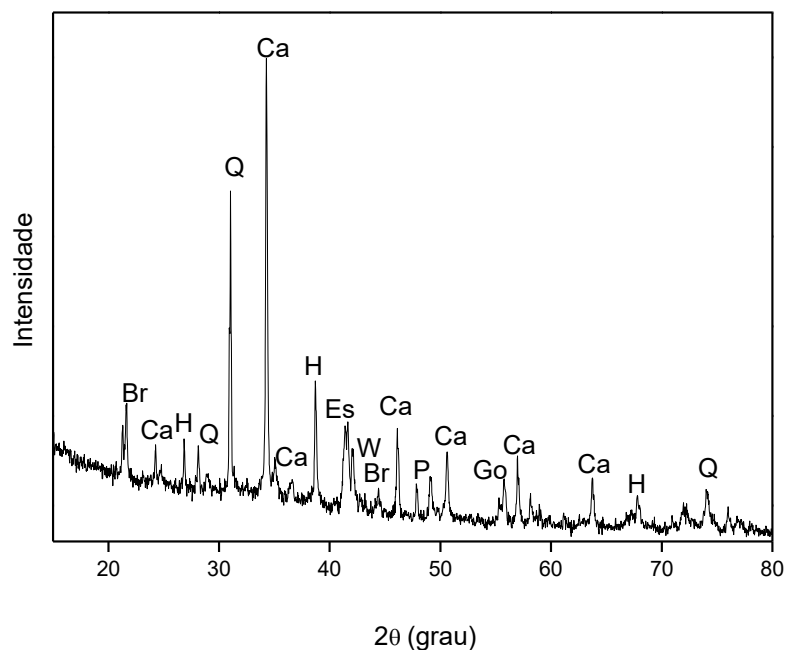
Fonte: Autora.

De acordo com os difratogramas de ambas as argilas é possível notar a presença de fases como o quartzo, caulinita, mica muscovita e anatásio. A presença da caulinita revela que essas argilas são tipicamente cauliniticas, e pode apresentar um comportamento de queima refratário. A mica muscovita pode auxiliar na formação de fase vítrea nas peças cerâmicas, devido a presença de fundente (K_2O) em sua estrutura (RIBEIRO, 2010).

O quartzo é a principal impureza presente, causa uma redução na plasticidade da argila e pode gerar trincas devido às suas transformações de fases quando ocorre a elevação da temperatura (SANTOS, 1989)

O argilomineral responsável por conferir plasticidade a argila, quando em misturada em água, é a caulinita (SOUZA, 2007).

Figura 17 - Difratograma da escória de alto-forno. Ca: calcita, Es: espinélios, Go: goetita, H: hematita M: magnetita, Q: quartzo, W: Wustita, Br: brucita, P: periclásio.



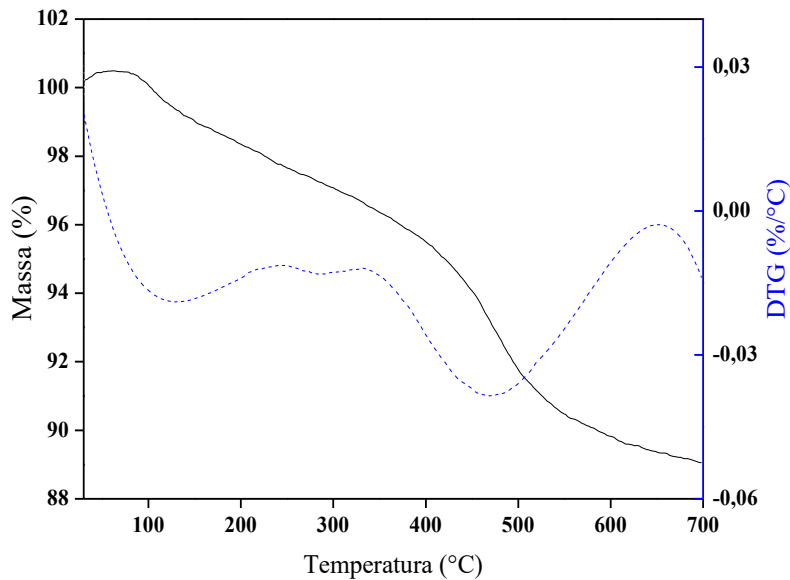
Fonte: Autora.

A difratometria de raios-X do resíduo, confirmando o já mostrado pela composição química, mostrou a presença de fases associadas ao ferro como a hematita, magnetita e wustita. Também foram observadas fases como a brucita, calcita, quartzo e periclásio. As fases de calcita e periclásio estão relacionadas aos óxidos de cálcio e magnésio respectivamente.

6.3. Análises termogravimétricas (TG/DTG)

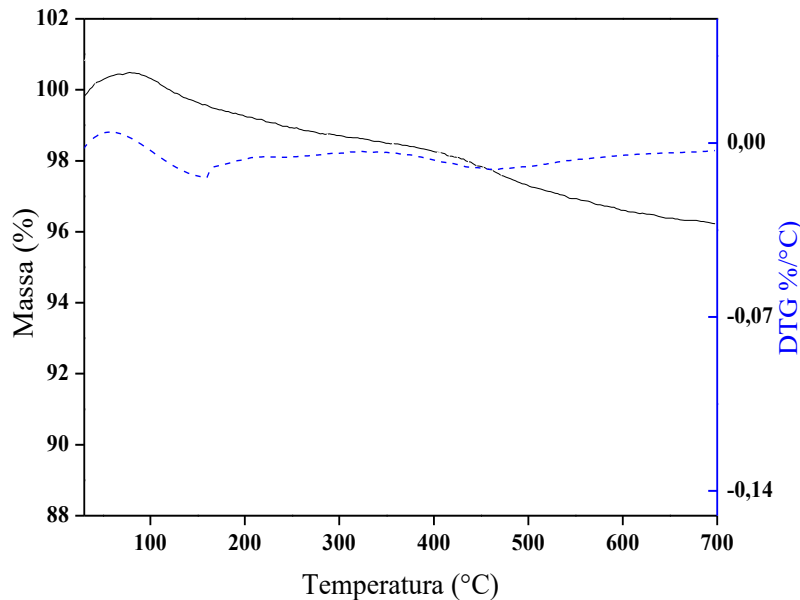
As figuras 18, 19 e 20 apresentam as análises gravimétricas (TG/DTG) da argila forte, argila fraca e do resíduo, respectivamente.

Figura 18 - TG/DTG da argila forte.



Fonte: Autora.

Figura 19 - TG/DTG da argila fraca.



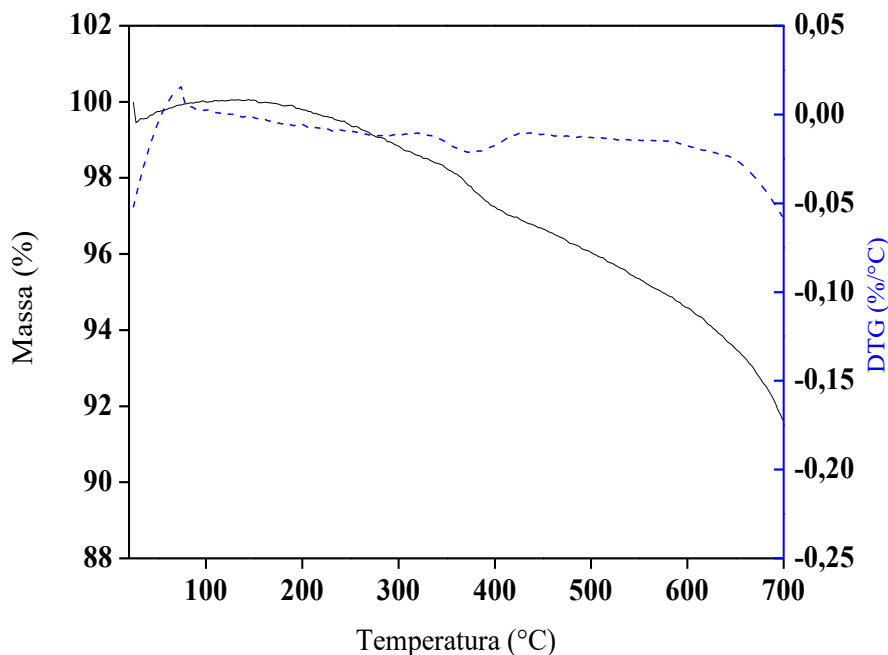
Fonte: Autora.

É possível notar nas curvas de TG/DTG das argilas que em aproximadamente 110 °C ocorre uma perda de massa devido à evaporação de água livre. Em

aproximadamente 450 °C ocorre nova perda de massa associada à desidroxilação da caulinita, transformando-se em metacaulinita (CANDIDO, 2012).

Foi observado nas Figuras 18 e 19 uma perda de massa menor na argila fraca comparada com a argila forte que está associada a uma maior quantidade de sílica que, como foi citado anteriormente, age como material inerte na etapa de queima dos materiais cerâmicos (Betini, 2007; Guimarães, 2017) na argila fraca como visto na Tabela 2.

Figura 20 - TG/DTG da escória de alto-forno.



Fonte: Autora.

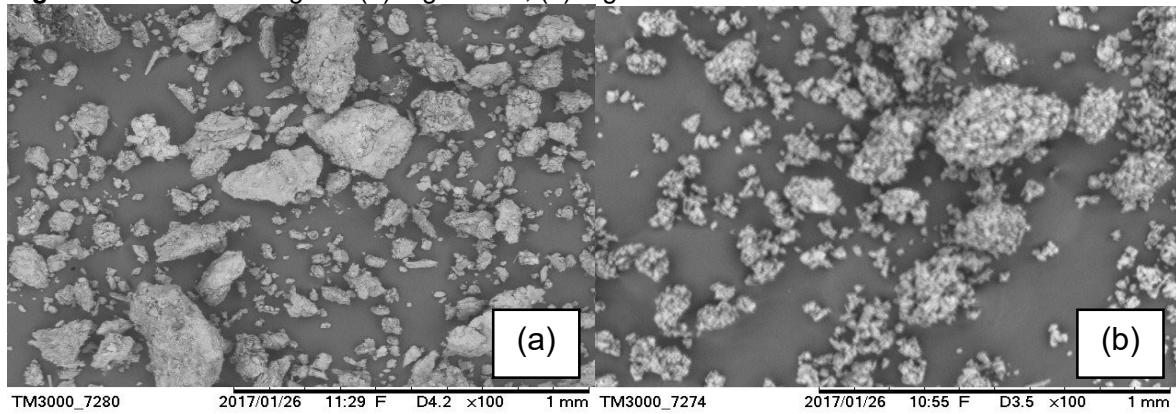
Na curva TG/DTG da escória, a aproximadamente 60 °C ocorre uma leve perda de massa correspondente à umidade. Em uma temperatura próxima a 200 °C há perda de massa associada à desidroxilação do hidróxido de magnésio. Em, aproximadamente, 450 °C observa-se nova perda de massa associada à desidroxilação do hidróxido de cálcio. O mesmo padrão foi descrito por (SILVA, 2018).

6.4. Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 21 apresenta as microscopias eletrônicas de varredura da argila forte (a) e argila fraca (b) e a Figura 22 mostra a micrografia da escória de alto-forno.

Nota-se que as argilas não apresentam um padrão, ou seja, são constituídas por partículas irregulares em forma e tamanho (COSTA, 2018).

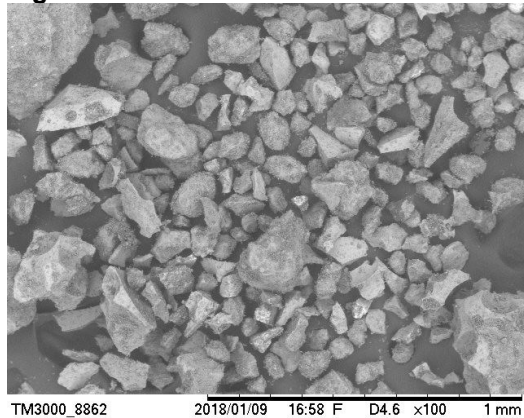
Figura 21 - MEV das argilas. (a) argila forte; (b) argila fraca.



Fonte: Adaptado de Silva, 2018.

Na Figura 22 é possível notar que a escória também é heterogênea quanto a forma e tamanho das partículas.

Figura 22 - MEV da escória.

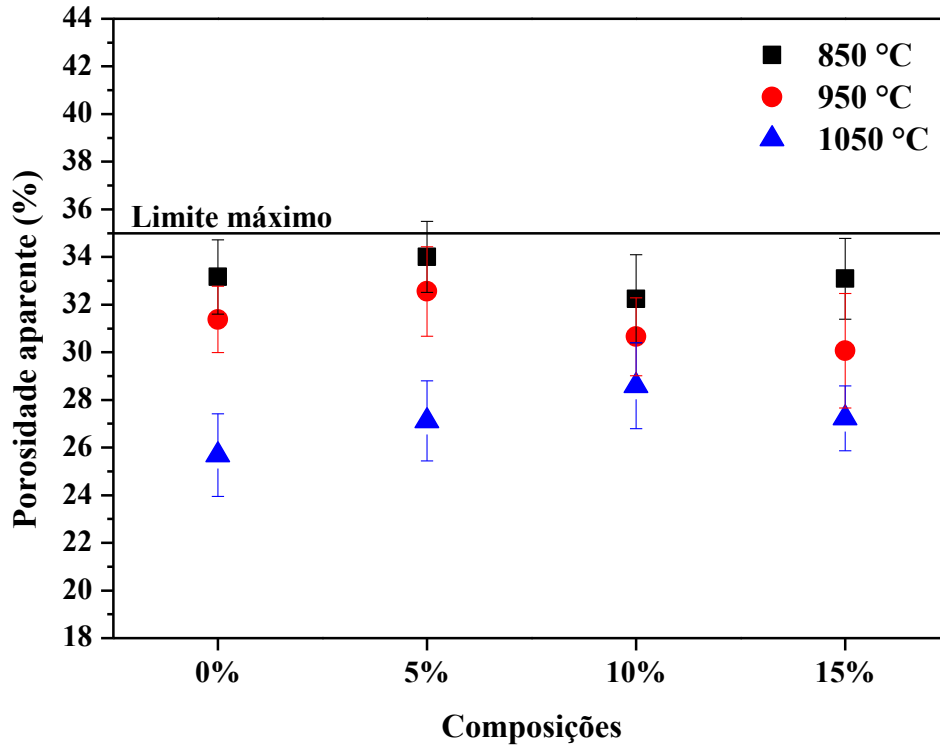


Fonte: Silva, 2018.

6.5. Porosidade aparente e massa específica aparente

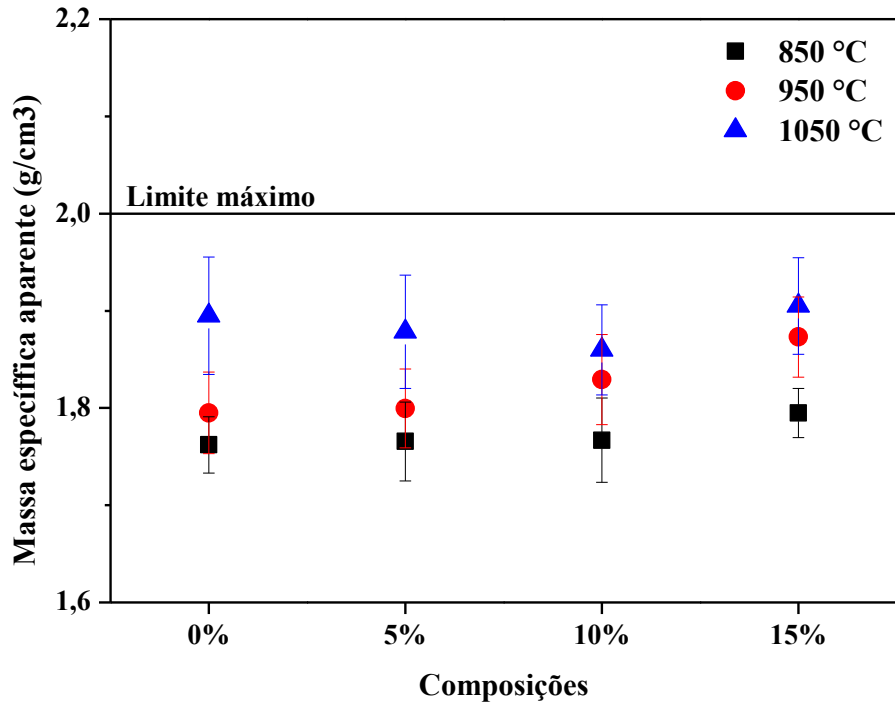
As Figuras 23 e 24 apresentam os gráficos de porosidade e massas específicas aparentes, respectivamente.

Figura 23 - Gráfico da porosidade aparente.



Fonte: Autora.

Figura 24 - Gráfico da massa específica aparente.



Fonte: Autora.

Nos gráficos representados pelas Figura 23 e 24 é possível notar que a mudança das composições não teve uma mudança relevante na porosidade das

peças e sim a mudança de temperatura, ou seja, a escória nessas composições pouco influenciou na porosidade e massa específica aparente. As peças apresentaram melhores propriedades na temperatura de 1050 °C e na composição de 15%.

O aumento da massa específica indica um melhor empacotamento das partículas na etapa da conformação, e, como consequência maior eficiência no coalescimento de grãos na etapa de queima ocasionando uma melhora nas propriedades tecnológicas da cerâmica (CANDIDO, 2012).

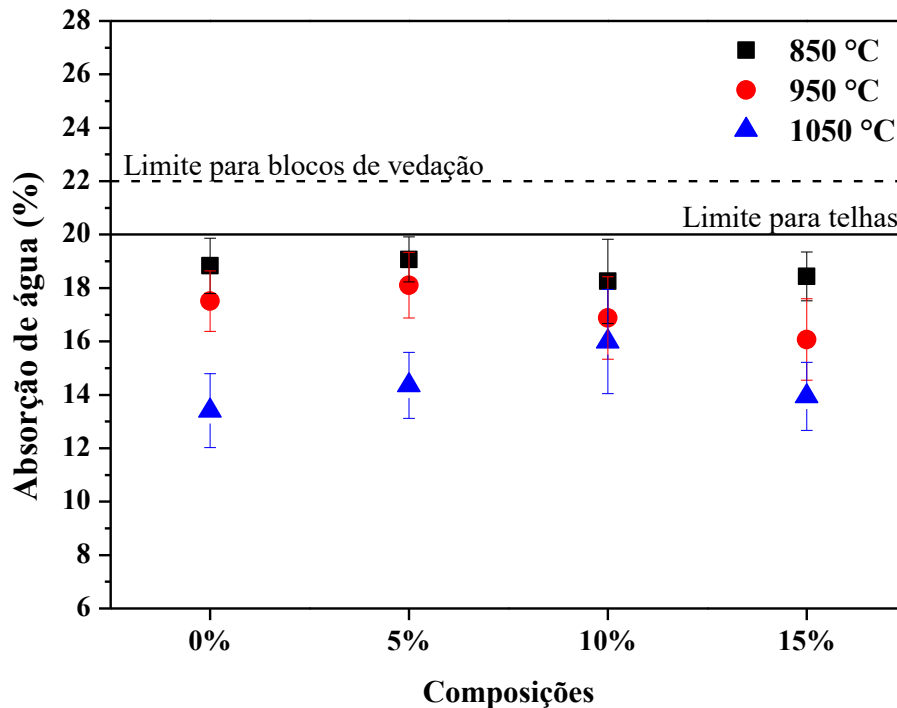
As peças queimadas a 850 °C apresentaram uma porosidade mais elevada e uma densificação inferior às peças de 950 e 1050 °C devido, provavelmente, ao não fechamento dos poros sugerindo que em temperaturas mais baixas o processo de sinterização não foi tão eficiente. As argilas da região de São Miguel do Guamá, por apresentarem elevado teor de sílica, podem apresentar um comportamento refratário durante a queima exigindo assim elevadas temperaturas de sinterização das peças (RACANELLI, 2017). Essa elevada concentração de sílica pode explicar a elevada porosidade e baixa massa específica observada nas composições sinterizadas a 850°C.

Santos (1989) estabeleceu uma faixa de valores de massa específica e porosidade aparente na queima de 950 °C que são comumente usados em cerâmica vermelha e todas as peças atingiram valores dentro das faixas estabelecidas (porosidade aparente: até 35%; massa específica aparente: até 2 g/cm³).

6.6. Absorção de água

A Figura 25 apresenta o gráfico de absorção de água das peças queimadas as temperaturas de 850, 950 e 1050 °C.

Figura 25 - Gráfico da absorção de água.



Fonte: Autora.

O gráfico de absorção de água, como o esperado pelos resultados anteriores, apresentou pouca variação com relação às diferentes composições, porém com o aumento da temperatura os valores de absorção diminuíram, principalmente na temperatura de 1050 °C.

Racanelli (2017) encontrou resultados semelhantes nas peças de AFO50AFR50 (semelhante a composição de 0%) queimadas às mesmas temperaturas. E, também, se comparados os resultados das misturas de argilas e o acréscimo de resíduo é possível notar resultados bastante parecidos.

Silva (2018) obteve resultados semelhantes na composição de 10% nas queimas de 850 e 950 °C, apresentou valores abaixo de 20%.

A redução dos valores de absorção de água nas temperaturas de 950 e 1050 °C, deve-se a formação de fase vítrea que contribui para a diminuição da porosidade (MONTEIRO E VIEIRA, 2004).

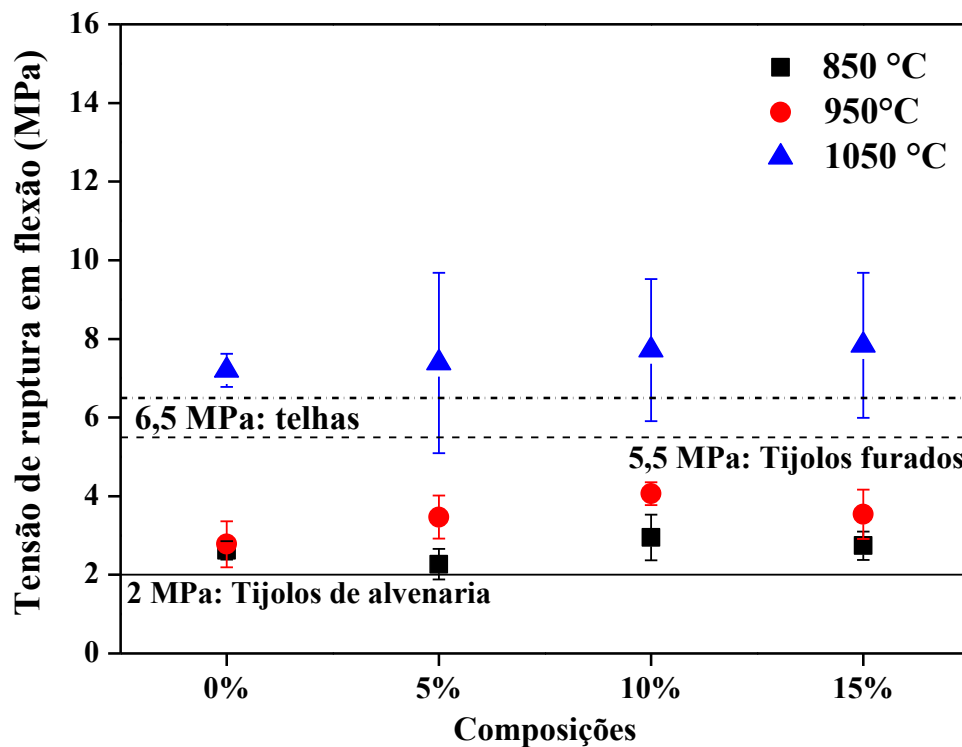
Conforme a ABNT 15270-1 (2017) o valor máximo de absorção de água para tijolos não deve ser inferior a 8% nem superior a 22%. Então, todas as peças estudadas estão dentro do padrão exigido por norma.

A ABNT 15310 (2009) exige que, para a fabricação de telhas, o limite de absorção de água deve ser de no máximo 20%. Isso significa que todas as peças estudadas se enquadram dentro da norma.

6.7. Flexão em três pontos

A Figura 26 apresenta o gráfico de resistência a flexão em três pontos.

Figura 26 - Gráfico de tensão de ruptura em flexão.



Fonte: Autora.

Melhores resultados foram obtidos na queima de 1050 °C, notável na figura 26, pois as reações de sinterização estão em estágio avançado, ocasionando uma maior densificação, e coesão das partículas promovendo melhora na resistência mecânica (GOUVEIA, 2008).

Racanelli (2017) observou em seu estudo um comportamento semelhante, ao utilizar as mesmas argilas, de aumento de resistência conforme ocorre há a elevação da temperatura.

É possível perceber que todas as peças estudadas alcançaram valores exigidos pela ASTM C674-77 e podem ser utilizadas para a fabricação de tijolos de

alvenaria. Entretanto, somente as composições queimadas a 1050 °C podem ser utilizadas para a fabricação de tijolos furados e telhas, pois alcançaram uma média superior a 6,5 MPa.

6.8. Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 27, 28, 29 e 30 apresentam as micrografias obtidas por microscópio eletrônico de varredura das cerâmicas adicionadas com 0, 5, 10 e 15% de escória, respectivamente, queimadas a 1050 °C.

É possível observar a presença de pontos de trinca (indicados pelas setas pretas) e a presença de muita porosidade (exemplificado pelo círculo preto demarcado) nas figuras 27 (c) e 28 (c).

Figura 27 - Micrografias de cerâmica vermelha queimada a 1050 °C sem adição de escória. (a) Aumento de 100x; (b) Aumento de 500x; (c) Aumento de 1000x.

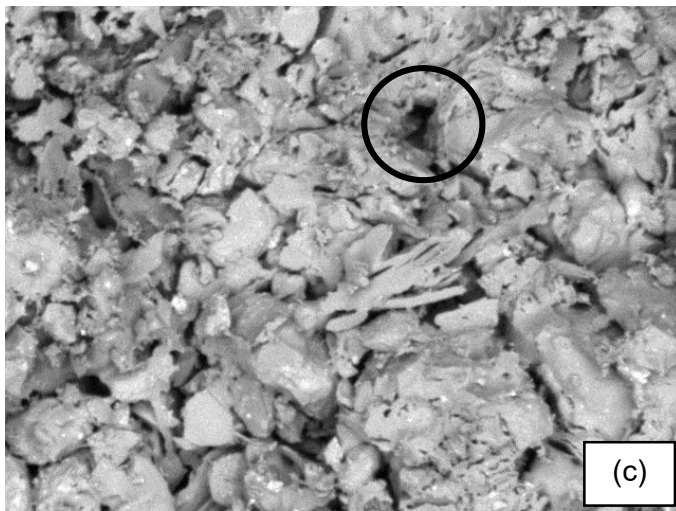
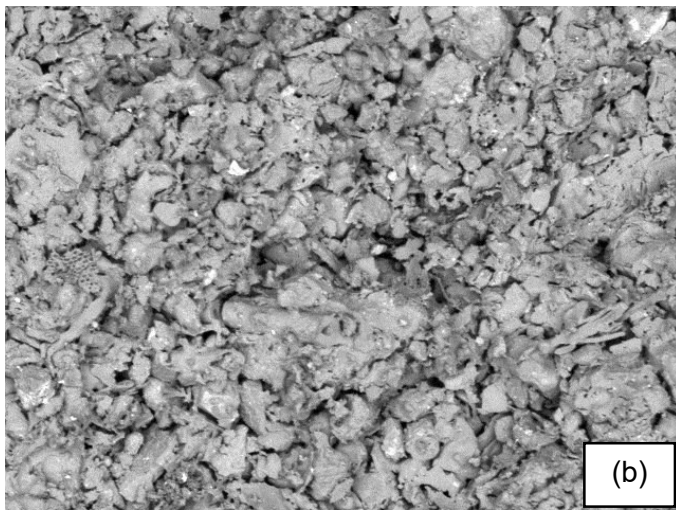
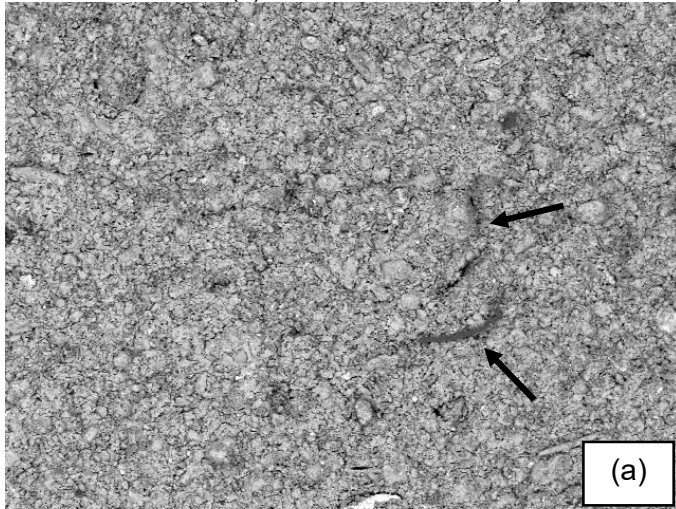
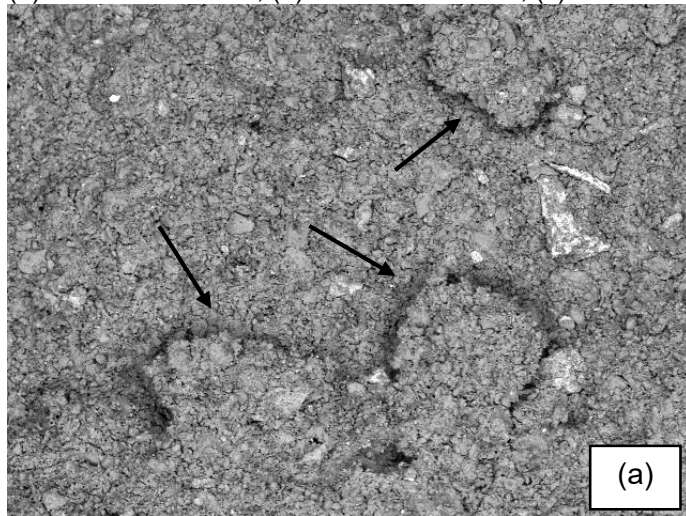
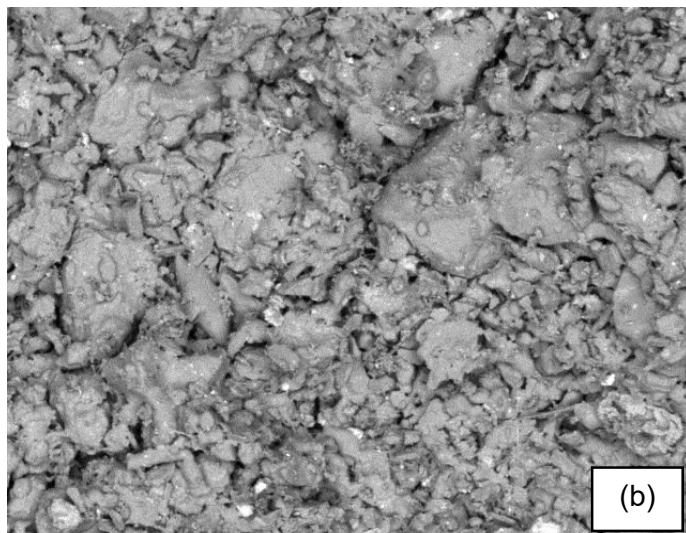


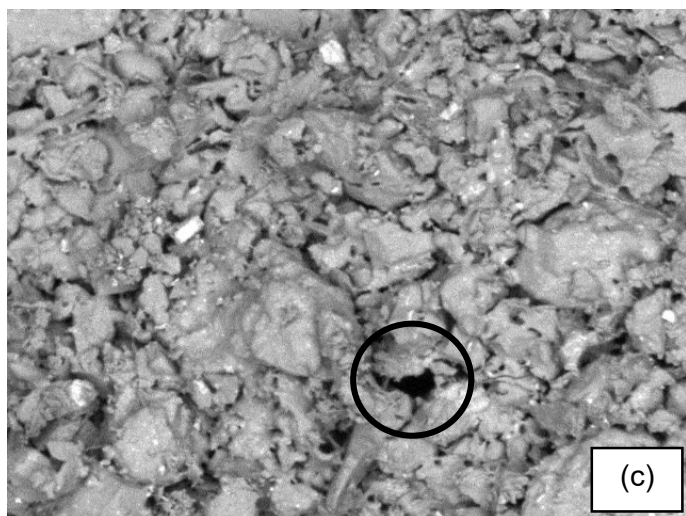
Figura 28 - Micrografias de cerâmica vermelha queimada a 1050 °C com 5% de escória adicionada. (a) Aumento de 100x; (b) Aumento de 500x; (c) Aumento de 800x.



UFPA - LME1980 2019/11/08 10:11 F D10.4 x100 1 mm



UFPA - LME1981 2019/11/08 10:14 F D10.5 x500 200 um



UFPA - LME1982 2019/11/08 10:17 F D10.5 x800 100 um

Figura 29 - Micrografias de cerâmica vermelha queimada a 1050 °C com 10% de escória adicionada. (a) Aumento de 100x; (b) Aumento de 500x; (c) Aumento de 500x.

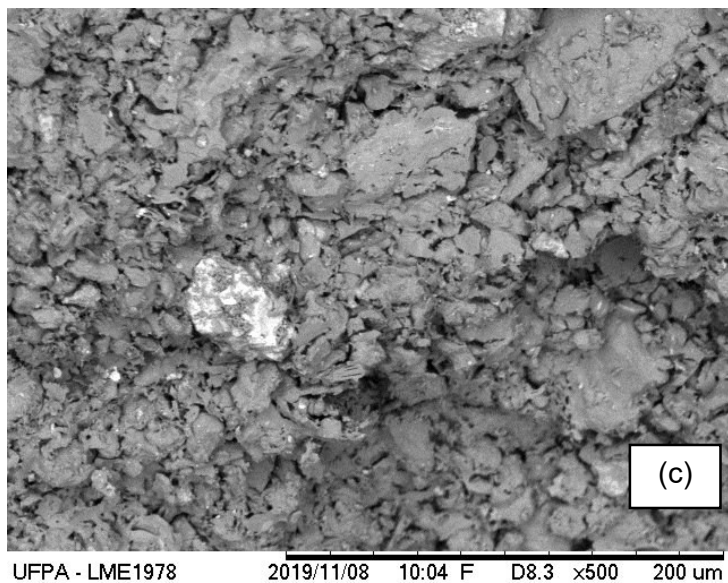
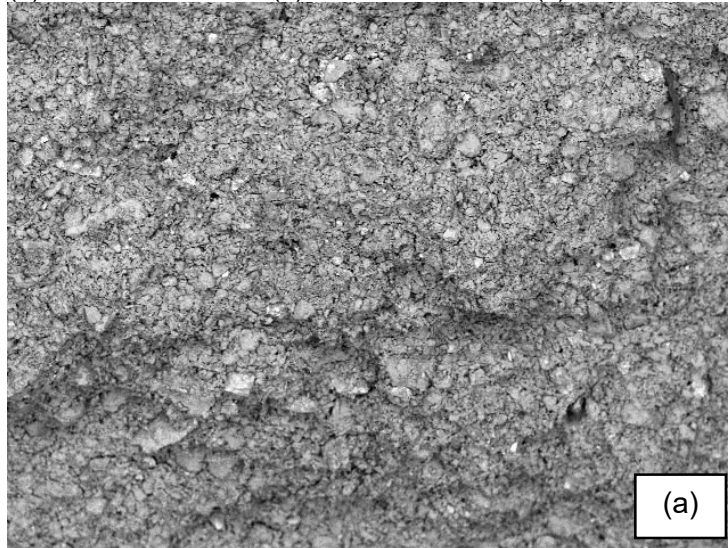
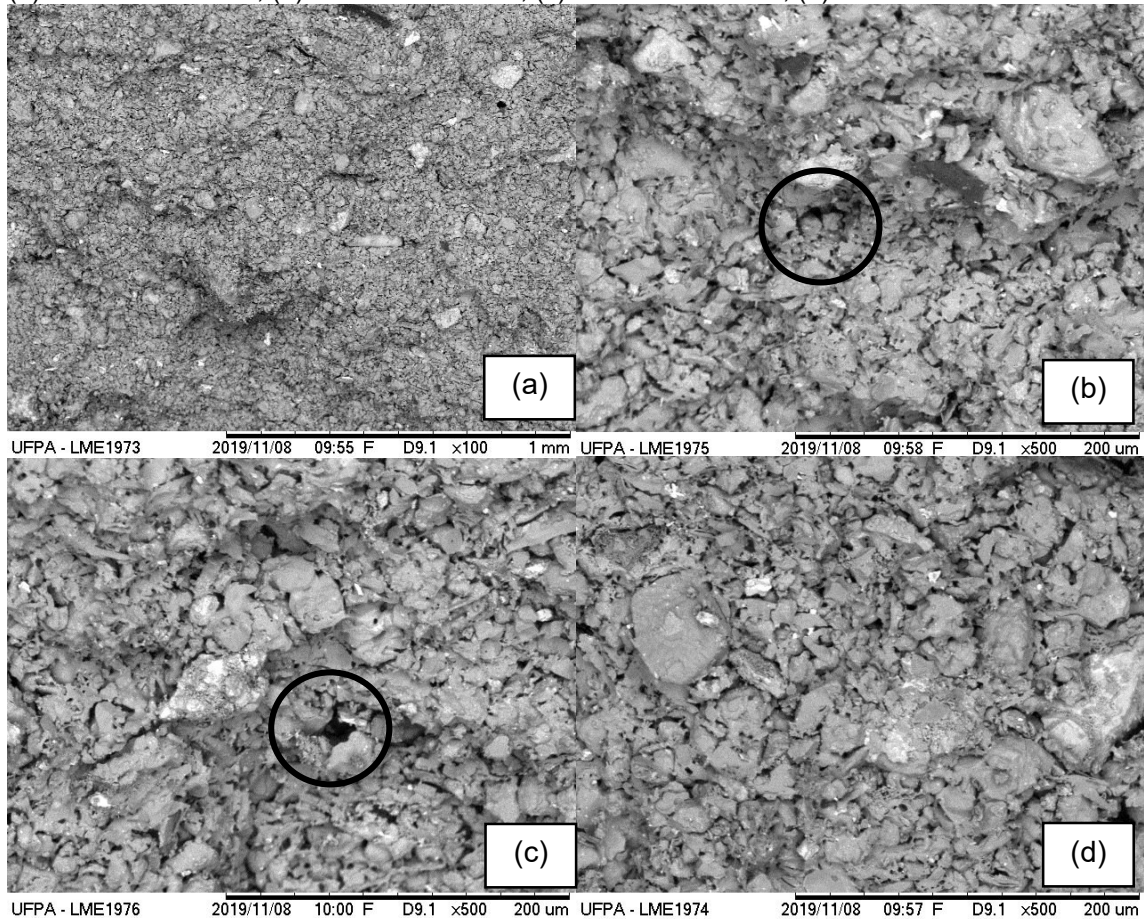


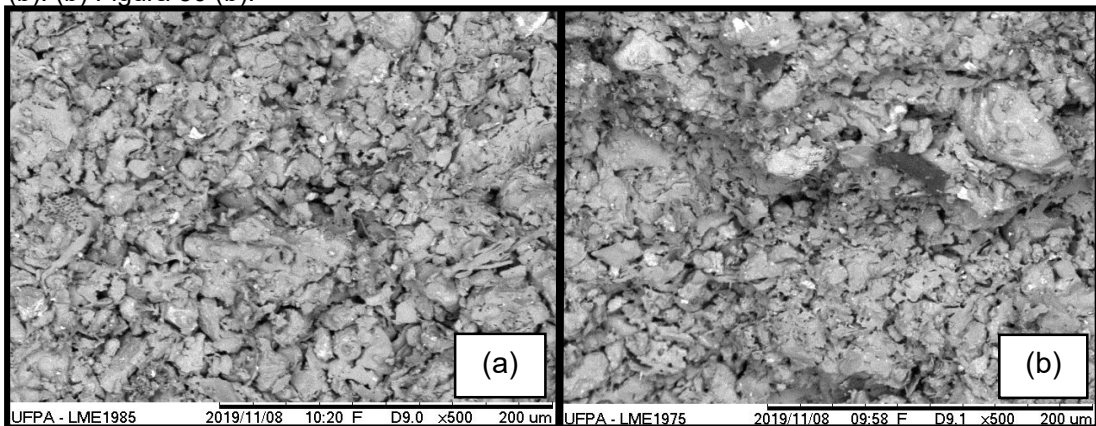
Figura 30 – Micrografias de cerâmica vermelha queimada a 1050 °C com 15% de escória adicionada. (a) Aumento de 100x; (b) Aumento de 500x; (c) Aumento de 500x; (d) Aumento de 500x.



Fonte: Autora.

É possível notar, também, que nas micrografias com adição de resíduo há grãos mais unidos, ocorre uma leve diminuição da porosidade, densificação do material e o coalescimento de grãos que pode ser visto, mais claramente se dispostas lado a lado a micrografia com composição somente com argilas (27 (b)) e a micrografia com adição de 15% de escória (30 (b)) mostrado na figura 31.

Figura 31 - Micrografia da composição sem escória e com 15% de escória lado a lado. (a) Figura 27 (b). (b) Figura 30 (b).



Fonte: Autora.

6.9. Difração de raios-x

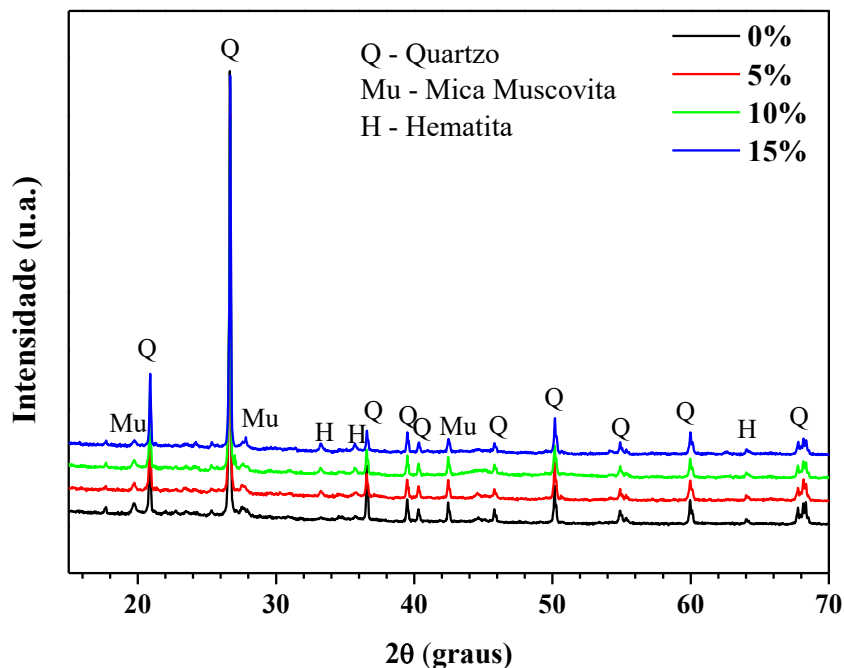
As figuras 32, 33 e 34 apresentam as difrações de raios-x das composições queimadas a 850, 950 e 1050 °C, respectivamente.

Em todas as composições e todas as temperaturas foram identificadas as fases cristalinas de quartzo, mica muscovita e hematita.

No difratograma de 1050 °C nota-se a presença da mulita que é uma fase cristalina da metacaulinita, aluminossilicato comum em argilas cauliníticas queimadas na temperatura de 1050 °C (VIEIRA *et al.*, 2005).

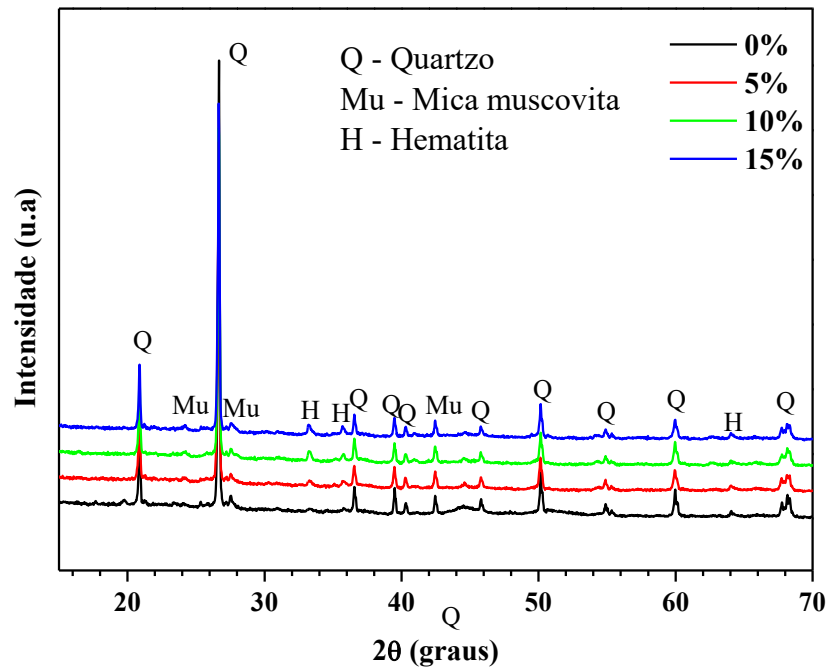
A mulita é comumente utilizada em cerâmicas refratárias por apresentar excelentes características como: alto módulo de ruptura, elevada refratariedade, boa resistência a choque térmico, à erosão e ao ataque químico (MAGLIANO E PANDOLFETTI, 2010).

Figura 32 - DRX das peças queimadas a 850 °C.



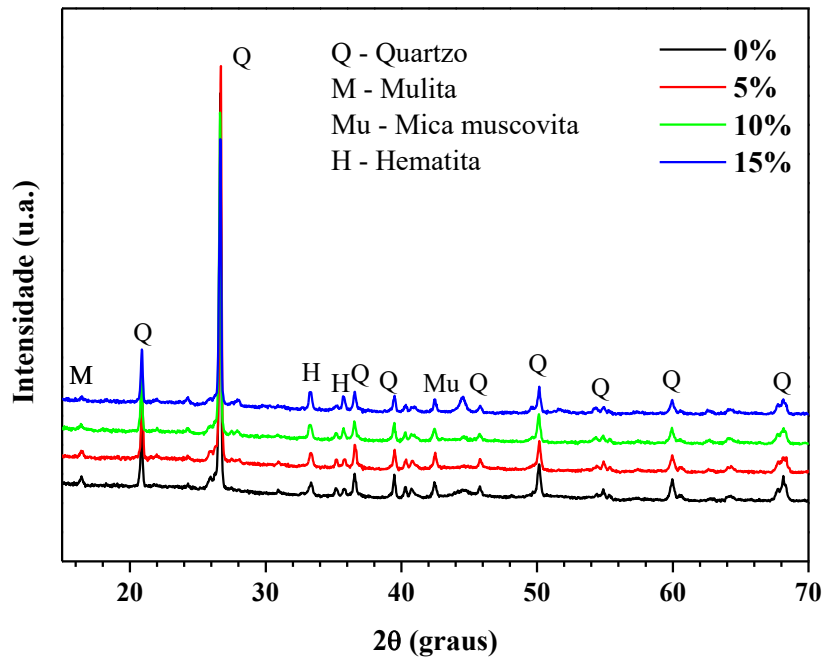
Fonte: Autora.

Figura 33 - DRX das peças queimadas a 950 °C.



Fonte: Autora.

Figura 34 - DRX das peças queimadas a 1050 °C.



7. CONCLUSÃO

Após fazer a análise dos resultados de cerâmica vermelha com adição de escória de alto forno foi permitido concluir que:

- a) As argilas apresentaram as fases mineralógicas de quartzo, caulinita, mica muscovita e anatásio. A escória de alto forno apresentou fases de hematita, magnetita, wustita, franklinita, calcita, brucita, periclásio, espinélios, goetita e quartzo;
- b) A presença de caulinita confere as argilas plasticidade quando misturadas em água;
- c) As microscopias mostraram que não há padrões de tamanho nem formatos de partículas nas argilas e nem na escória de alto forno;
- d) Todas as peças estudadas apresentaram valores de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente dentro dos exigidos por normas e dos desejáveis que foram estabelecidos por Santos (1989);
- e) No ensaio de ruptura em flexão as peças queimadas a 850 e 950 °C apresentaram valores que podem ser usados em blocos de vedação e tijolos furados, entretanto somente as peças queimadas a 1050 °C podem ser utilizadas para a fabricação de telhas;
- f) Os MEVs das peças queimadas mostram que há uma diminuição da porosidade conforme há o crescimento de resíduo, ou seja, grãos mais unidos, aumentando o grau de densificação das peças;
- g) Os DRXs de todas as queimas apresentaram fases de quartzo, mica muscovita e hematita, porém apenas a queima de 1050 °C apresentou a fase cristalina da mulita.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros é interessante:

- a) Realizar os ensaios de liquidez e plasticidade com as mesmas composições;
- b) Realizar ensaio granulométrico;
- c) Testar diferentes composições e temperaturas;
- d) Testar outros tipos de resíduos.

9. REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. ABCERAM. Disponível em:<<https://abceram.org.br/>>. Acesso em: Agosto de 2019, 16h.

ALMEIDA, G. M. **Utilização de escória produzida em alto-forno a carvão vegetal como agregado graúdo e miúdo para concreto**. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

ARCELLOR MITTAL. Disponível em:< <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno> >. Acesso em: Agosto de 2019, 21h.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15310**: Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C373 – 88**. Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C674 – 13**. Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials, 2013.

Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Disponível em:
<<https://www.anicer.com.br/anicer/>>. Acesso em: Agosto de 2019, 18h.

BATTAGIN, I. L. S.; SBRIGHI, C. **Precauções e limitações do uso de escórias como agregado na construção civil**, CPTI, São Paulo: 2002.

BETINI, D. G. **Inovação na tecnologia de produtos de cerâmica vermelha com uso de chamote em São Miguel do Guamá**. 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

BOCH, P.; NIÈPCE, J. C. **Ceramic Materials: Processes, Properties and Applications**, ISTE: 2007.

CALDAS, T. C. C. **Reciclagem de resíduo de vidro plano em cerâmica vermelha**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

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

Centro de coprodutos aço Brasil. **Estatística**. Disponível em:
<<http://www.ccabrasil.org.br/estatisticas.asp>>. Acessado em: 27 de Julho de 2018.

CORDOVIL, G. V. **Pólo cerâmico e dinâmica territorial do desenvolvimento em São Miguel do Guamá-PA**. 2010. 161 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Geografia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

COSTA, R. L. S. **Influência da incorporação da lama de alto forno em massa cerâmica para a produção de telhas**. 2017. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

DONDI, M.; MARSIGLI, M.; FABBRI, B. Recycling of industrial and urban wastes in brick production: a review, **Tile & Brick International**, v. 3, n. 3, p. 218-225, 1997.

DUALIBI FILHO, J.; CARVALHO, O. O. Os Números da Vermelha. **Revista Mundo Cerâmico**, n. 83, p. 34-38, 2002.

FARIA, J. S. **Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha**. Orientador: Carlos Maurício Fontes Vieira. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Campos dos Goytacazes, 2015.

GUIMARÃES, C. A. O. **Avaliação do ciclo de queima nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha**. Orientador: Carlos Maurício Fontes Vieira. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

HEREK, L. C. S.; JÚNIOR, A. T. S.; PAVEZZI, C. C.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G. Incorporação de lodo de lavanderia industrial na fabricação de tijolos cerâmicos. **Cerâmica**, v. 55, p. 326-331, 2009.

JONKER, A.; POTGIETER, J.H. An evaluation of selected waste resources for utilization in ceramic materials applications. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, p. 3145–3149, 2005.

KELES, K. C. **Influência da basicidade da escória de alto forno como adição ao concreto**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

KINGERY, B. U. **Introduction to Ceramics**. 2. ed. New York: John Wiley, 1976.

MAGLIANO, M. V. M.; PANDOLFELLI, V. C. Multitização em refratários utilizando diferentes fontes precursoras: revisão. **Cerâmica**, v. 56, n.340, p.368-375, 2010.

MAIA, F. S. **Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do polo cerâmico de Campos dos Goytacazes**. 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.

MALHOTRA, V. M. **Supplementary cementing materials for concrete**. In: Blast furnace slag cement mortar and concrete: durability aspects. Ed. V. M. Malhotra, 1987.

MARTELLI, M. C. **Transformações térmicas e propriedades cerâmicas de resíduos de caulins das regiões do rio Capim e do rio Jari – Brasil**. 2006. 148 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

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

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. Ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MOTTA, J. F. M.; CABRAL JÚNIOR, M.; TANNOM, L. C.; ZANARDO, A. As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. **Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 1, p. 33-40, 2002.

NORTON, F. H. **Introdução à tecnologia das cerâmicas**. Ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1973.

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2. Ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

OSHIMOTO, E.; THOMAZ, E. **Materiais Cerâmicos para Construção Civil**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1990.

RACANELLI, L. A. **Caracterização e determinação das propriedades tecnológicas de massas argilosas para fabricação de blocos de vedação**. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

REED, J. S. **Principles of ceramics processing**. 2. ed. New York: John Wiley, 1995.

SÁNCHEZ, E.; GINES, F.; AGRAMUNT, J. V.; MONZÓ, M. Control de Calidad de las arcillas empleadas en la fabricación de los soportes de baldosas cerâmicas. *Qualicer* 98. Castellon, 1997.

SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. v. 1.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: PEARSON, 2008.

SILVA, J. G. **Análise do ciclo de vida de tijolos prensados de escória de alto-forno**. 2005. 225 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

SILVA, M. C. P. **Incorporação de escória de alto-forno em cerâmica vermelha para produção de blocos de vedação**. 2018. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, 2018.

SOARES, K. F. **Incorporação do resíduo proveniente da Estação de Tratamento de Efluente da Indústria Têxtil em massa cerâmica**. 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

VLACK, L. H. V. **Propriedades dos materiais cerâmicos**. Ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1973.

VICENZI, J. **Efeito da adição de chamota em uma massa cerâmica de argila vermelha**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

VIEIRA, C. M. F.; ANDRADE, P. M.; MACIEL, G. S.; VERNILLI JÚNIOR., F.; MONTEIRO, S. N. Incorporation of fine steel sludge waste into red ceramic, **Materials Science and Engineering**, v.427, p.142-147, 2006.

VITORINO, J.P.D.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, v.55, p.385–392, 2009.