



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CAMPUS ANANINDEUA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

KATE THAYANE SANTOS BEZERRA

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM MASSA ARGILOSA PARA A
PRODUÇÃO DE BLOCOS DE VEDAÇÃO**

ANANINDEUA

2019

KATE THAYANE SANTOS BEZERRA

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM MASSA ARGILOSA PARA A
PRODUÇÃO DE BLOCOS DE VEDAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de grau
de Bacharel em Engenharia de Materiais, pela
Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof.^a Dr.^a. 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)

B574u Bezerra, Kate Thayane Santos
Utilização de escória de alto forno em massa argilosa
para a produção de blocos de vedação / Kate Thayane
Santos Bezerra. — 2019.
53 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 de alto forno. 3.
Blocos de vedação. I. Título.

CDD 620.14

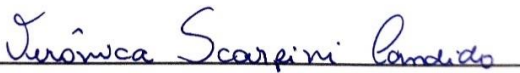
KATE THAYANE SANTOS BEZERRA

UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM MASSA ARGILOSA PARA A
PRODUÇÃO DE BLOCOS DE VEDAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de grau
de Bacharel em Engenharia de Materiais, pela
Universidade Federal do Pará.

Ananindeua, 02 de dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA



Prof.^a Dr.^a Verônica Scarpini Cândido



Prof. Dr Alisson Clay Rios da Silva



Prof. Mestre Maurício Maia Ribeiro

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe por todo o suporte e por todo apoio que me deu durante essa jornada. Agradeço a minha avó, Maria, por todo o carinho e por todos os conselhos que me deu durante esses 22 anos de vida.

Agradeço a cada um dos professores que atravessaram minha trajetória, do ensino fundamental ao médio. Pois sem cada um deles eu nunca teria alcançado o sonho de ser uma aluna da UFPa.

Ao corpo docente da FEMAT, e principalmente, ao professor Deibson que fez muito pela turma de 2015.

Ao K.R.A.C.K por todos os trabalhos, risadas, brincadeiras e reclamações ao longo desses cinco anos, em especial a Rafaela que tem sido parceira para todas as horas no final dessa trajetória e ao Avener por ouvir todos os meus problemas pessoais e se importar.

Agradeço ao meu amigo, Rodolfo, por todas as vezes que foi até a usina me ajudar a terminar meus intermináveis experimentos, sem tua ajuda teria sido mais difícil.

Ao Felipe, pelas incontáveis vezes que me impediu de surtar e largar tudo para trás. Obrigada pela companhia nos dias ruins.

Ao Fábio, por ter feito minha inscrição em engenharia de materiais mesmo sem que eu soubesse nada sobre o curso. No fim das contas foi uma das escolhas mais acertadas da minha vida, obrigada.

Aos dois orientadores que eu tive durante esse período de graduação. Ao Carlos por abrir meus olhos para as possibilidades da pesquisa e a Verônica pelas oportunidades de conhecimento e crescimento.

E em especial, agradeço a Carla, por ter sido a pessoa com quem eu mais pude contar durante esses 5 anos. Obrigada por todas as traduções de artigos, por todas as pesquisas que tu fizestes porque eu não tinha internet, obrigada por todos os trabalhos que tu leste pra me dar opinião, obrigada por me deixar falar sobre meus ensaios ainda que tu não entendas do que se trata, e principalmente, obrigada por ter me feito acreditar que eu conseguiria.

Eu agradeço a todos os familiares e amigos que de alguma forma me apoiaram, torceram e rezaram para que eu chegasse ao fim dessa jornada com meu diploma em mãos. Muito obrigada.

“Os dois dias mais importantes da vida de um homem são: o dia que ele nasce e o dia em que descobre o porquê.”

Mark Twain

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência da adição de escória de alto-forno na microestrutura e nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha para a produção de blocos de vedação. Inicialmente, as matérias primas foram caracterizadas química e mineralogicamente por Difração de Raio-X (DRX) e por Fluorescência de Raio-X (FRX). Logo após a caracterização química e mineralógica o comportamento térmico dos materiais foi estudado, através das análises termogravimétricas (TG) e térmica diferencial (DTG). Assim que finalizada a etapa de caracterização mineral, química e térmica, foram preparados corpos de prova com adição de 0, 5 e 10% em peso de escória que foram sinterizados em duas temperaturas distintas (900 e 1000° C). As propriedades mecânicas determinadas foram absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), Massa específica aparente (MEA) e resistência a flexão em três pontos (σ). Os resultados indicam que a escória pode ser incorporada à matriz cerâmica, visto que, foram obtidos resultados dentro do padrão esperado.

PALAVRAS-CHAVE: Escória de alto-forno. Cerâmica vermelha. Blocos de vedação.

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the addition of blast furnace granulate in the microstructure and in the technological properties of the red ceramics to produce sealing blocks. Initially, the solutions were characterized as chemistry and mineralogical by x-ray diffraction (XRD) and by x-ray fluorescence (XRF). Soon after the chemical and mineralogical characterization of the thermal behavior of the plants was studied, through the thermogravimetric (TG) and differential (DTG) analyzes. After finishing a stage of mineral, chemical and thermal characterization, the first samples were collected in layers of 0, 5 and 10% by wt. of slag that were sintered at three different temperatures (900 and 1000 ° C). The technology properties were water absorption (AA) and three-point flexural strength (σ). The obtained results include a slag can be incorporated into the ceramic matrix, since, they were found in the rocks of the expected pattern.

KEYWORDS: Blast furnace slag. Red ceramics. blocks

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 5.1 – Moinho de bolas utilizado para homogeneizar as massas.....	28
Figura 5.2 – Prensa hidráulica (a) e molde de aço (b).....	29
Figura 5.3 – Corpos de prova após a queima.....	30
Figura 6.1 – Difratoograma de Raios X da Argila Forte. C = caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A = anatásio.....	32
Figura 6.2 – Difratoograma de Raios X da Argila Fraca. C = caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A = anatásio.....	33
Figura 6.3 – Difratoograma de Raios X da Escória de Alto Forno. Ca = calcita; Q = quartzo; H = hematita; Go = goetita; Es = minerais esmectílicos.....	34
Figura 6.4 – Curvas de TG e DTG da argila forte.....	36
Figura 6.5 – Curvas de TG e DTG da argila fraca.....	37
Figura 6.6 – Curvas de TG e DTG da escória de alto forno.....	38
Figura 6.7 – Absorção de água das cerâmicas queimadas a 900 e 1000°C. Com adição de 0%, 5% e 10% em peso de escória	40
Figura 6.8 – Porosidade aparente. 0% 5% e 10% Escória	41
Figura 6.9 – Massa específica aparente. 0% Escória; 5% Escória; 10% Escória	42
Figura 6.10 – Resistência à Flexão. 0% de escória, 5% de escória e 10% escória.....	44
Figura 6.11 – Micrografias obtidas por MEV das peças com adição de 0, 5 e 10% de escória, queimadas a 1000°C.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Composição em peso das matérias-primas utilizadas.....	27
Tabela 6.1 – Composição química das matérias-primas estudadas.....	35
Tabela 6.2 – Limite de Atterberg das amostras.....	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3 JUSTIFICATIVAS.....	15
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
4.1 Indústria de cerâmica vermelha.....	16
4.1.1 Polo cerâmico do Pará.....	17
4.2 Materiais cerâmicos	18
4.2.1 Blocos de Vedação	18
4.2.2 Argilas	19
4.2.3 Argilas da Região Norte	20
4.3 Indústria siderúrgica	21
4.3.1 Alto forno.....	22
4.3.2 Tipos de escórias	22
4.4 Resíduos	23
4.4.1 Resíduos sólidos	24
4.4.2 Efeito da incorporação de resíduos da indústria cerâmica	24
5. MATERIAIS E MÉTODOS	26
5.1 Materiais utilizados	26
5.2 Metodologias empregadas	26
5.2.1 Beneficiamento das matérias-primas.....	26
5.2.2 Caracterização das matérias-primas	26
5.2.2.1 Análise química.....	27
5.2.2.2 Difração de Raios-X.....	27
5.2.3 Formulação das massas argilosas	27

5.2.4 Plasticidade	28
5.2.5 Umidificação da massa.....	29
5.2.6 Conformação dos corpos de prova.....	29
5.2.5.1 Secagem dos materiais	29
5.2.5.2 Sinterização dos corpos de prova.....	30
5.2.6 Determinação das propriedades físicas.....	30
5.2.6.1 Absorção de água.....	30
5.2.6.2 Porosidade aparente.....	30
5.2.6.3 Massa específica aparente	31
5.2.6.4 Tensão de ruptura a flexão	31
5.2.6.5 Análise morfológica.....	31
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
6.1 Caracterização das matérias-primas	32
6.1.1 Caracterização mineralógica	32
6.1.2 Caracterização química	34
6.1.3 Análise Termogravimétrica.....	36
6.2 Propriedades físicas e mecânicas	38
6.2.1 Plasticidade	38
6.2.2 Absorção de água.....	39
6.2.3 Porosidade Aparente	40
6.2.4 Massa específica aparente.....	42
6.2.5 Resistência a flexão.....	43
6.3 Caracterização das peças queimadas	44
6.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	44
7. CONCLUSÕES	47
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Mesmo sendo uma das mais antigas, a indústria cerâmica, não obteve grandes avanços tecnológicos nos seus meios de produção. E como consequência dessa realidade, observa-se uma produção altamente baseada no empirismo, além de um alto consumo de energia para a produção de peças com baixo valor agregado (RACANELI, 2017).

Ainda assim, é notável a importância do setor cerâmico na economia do Brasil. Segundo dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), em 2010 foram registrados aproximadamente 293 mil empregos diretos, 900 mil empregos indiretos e uma receita anual de R\$ 18 bilhões de reais. Sendo 6.903 o total de cerâmicas e olarias registradas em funcionamento.

A alta capacidade produtiva do setor cerâmico brasileiro deve-se a grande extensão e volume de jazidas de argila, a principal matéria-prima da indústria ceramista, espalhadas por todo o território nacional (RAMOS et al., 2010). No estado do Pará, o principal polo cerâmico localiza-se na região nordeste do estado, no município de São Miguel do Guamá. Este possui capacidade produtiva suficiente para suprir boa parte da necessidade de tijolos e telhas da região. Ademais, é considerada a principal atividade econômica município, haja vista, que é responsável por 3 mil empregos diretos (RACANELI, 2017).

Em se tratando de variedade produtiva, a região é voltada principalmente para a produção de tijolos, um produto de valor agregado consideravelmente baixo, e uma minoria para a produção de telhas (SEDEME, 2012). Sendo que em ambos os processos produtivos não há uma análise prévia da mistura das massas, fato que ocasiona alta perda de material e uma produção de baixa eficiência (RAMOS, 2010).

Atualmente, existem inúmeros trabalhos voltados para a utilização de resíduos sólidos na indústria cerâmica. Essa incorporação busca principalmente a diversificação da produção e a destinação adequada dos resíduos (BILDHAUER, 2015). Os resíduos da produção de ferro, devido a sua abundância e dificuldade de descarte, então entre os que são comumente utilizados na indústria cerâmica. Entre eles estão a escória, o pó de balão e o pó de despoeiramento (CASTRO, 2016).

Tendo em vista o cenário nacional, onde há necessidade de otimização da produção da indústria cerâmica e também de descarte adequado dos resíduos da

indústria siderúrgica, este trabalho tem como objetivo estudar as propriedades que serão conferidas a peças cerâmicas formuladas a partir de duas argilas provenientes do município de São Miguel do Guamá com adição de escória granulada de alto-forno, proveniente de uma siderúrgica do sudeste do estado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da incorporação de escória de alto-forno em massa cerâmica para a produção de blocos de vedação.

2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar quimicamente as matérias-primas estudadas.
2. Formular corpos de prova com adição de 0, 5 e 10% em peso de escória de alto-forno.
3. Sinterizar os corpos de prova nas temperaturas de 900 e 1000° Celsius.
4. Analisar as propriedades físicas e mecânicas dos CP'S com adição de escória de alto-forno.
5. Caracterizar morfologicamente a superfície da fratura dos corpos de prova

3 JUSTIFICATIVAS

Com o advento de novas tecnologias, surge uma demanda maior de bens de consumo. Essa demanda, por sua vez, é responsável pelo aumento na produção de resíduos.

Visto isso, esse trabalho justifica-se ambientalmente já que a utilização da escória de alto forno em massa argilosa diminui o descarte inadequado desse resíduo gerando um ganho ambiental. Além disso, essa utilização diminui o consumo de matéria argilosa, gerando também uma diminuição dos danos ambientais causados pela extração dessa matéria-prima.

Por outro lado, pode-se justificar esse trabalho economicamente, pois essa incorporação contribui com a diversificação da produção, gerando peças com maior variação estrutural e com melhores propriedades possibilitando, assim, que estas sejam comercializadas com maior valor agregado.

É possível, também, produzir avanços tecnológicos na produção pois é notável que ainda hoje a produção de cerâmica é altamente baseada no empirismo. E essa característica de produção além de permitir baixo valor agregado as peças acabadas é responsável pela grande perda de material acabado, gerando assim, maior custo de produção e maior gasto de matéria prima.

Tendo isso em vista, a otimização da produção pode contribuir com a diminuição de custos gerando maior lucro para a empresa e menor consumo de matéria-prima, trazendo ganho econômico e ambiental

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Indústria de cerâmica vermelha

A indústria de cerâmica vermelha ou cerâmica tradicional é aquela responsável pela produção de blocos, tijolos, telhas, tubos, ladrilhos, elementos vazados e outros (RIPOLI, 1997). As matérias-primas utilizadas por esse segmento industrial são argilas plásticas (caulinito-ilíticas), cujos componentes principais são argilominerais, matéria orgânica, óxidos de ferro e óxidos de alumínio (RIPOLI, 1997). Porém, a composição química das argilas é bastante heterogênea e varia de acordo com a formação geológica e localização de extração (RAMOS, 2010).

O subsolo brasileiro apresenta uma grande concentração de depósitos minerais. Sendo esses expressivos, mesmo em comparação com o cenário mundial (FERREIRA, 2012). Segundo dados do Anuário Mineral Brasileiro (DNPM, 2010) as reservas de minerais argilosos correspondem a seis trilhões de toneladas. Essa alta concentração de matéria-prima está diretamente relacionada com o crescimento desse setor industrial no Brasil (RAMOS, 2010).

As argilas, que são as principais matérias-primas da indústria cerâmica, e devido a sua estrutura mineralógica muito heterogênea e nem todas são adequadas para a indústria. As melhores argilas para a produção de corpos cerâmicos são fáceis de desagregar, apresentam alta concentração de argilominerais e resistência após a queima (RAMOS, 2010).

O setor cerâmico possui grande importância social e econômica no Brasil. Esse seguimento industrial é responsável por um faturamento anual que chega a R\$ 6 bilhões de reais, valor correspondente a 1% do produto interno bruto (PIB) do Brasil. Ademais, as 12 mil pequenas e médias olarias espalhadas pelo Brasil geram 650 mil empregos diretos e 2 mil empregos indiretos (RAMOS, 2010; FERREIRA, 2012).

Porém, o alto consumo de matéria-prima é uma característica latente da indústria cerâmica. Segundo Ramos (2010), são utilizadas 70 milhões de toneladas de argila anualmente. De acordo com o ministério de minas e energia (2011) a argila é o 4º mineral mais explorado em território brasileiro. E essa exploração é responsável por um alto índice de degradação ambiental já que o processo de extração mineral ocorre somente após a extração da vegetação e do solo, em muitos casos os danos são irreversíveis (FERREIRA, 2012).

Apesar de demandar altas quantidades de matéria-prima e gerar um dano ambiental considerável a indústria cerâmica possui a capacidade de absorver resíduos de outras indústrias e até dela mesma sem que essa adição comprometa suas propriedades. Essa capacidade tem sido vista nos últimos anos como uma alternativa para minimizar os impactos ambientais gerados pelo meio industrial (ACCHAR, 2008).

4.1.1 Polo cerâmico do Pará

No âmbito nacional as regiões sul e sudeste destacam-se na produção de cerâmica vermelha, em se tratando de região norte do país o destaque de produção é o estado do Pará. Existem, no estado, 7 microrregiões economicamente importantes. No ano de 2014 encontravam-se cadastradas 200 empresas do setor ceramista no estado, sendo estas responsáveis por 15 mil empregos diretos e 40 mil empregos indiretos (RACANELI, 2017).

Dentre os polos ceramistas encontrados no Pará, pode-se destacar o polo de São Miguel do Guamá. Este, encontra-se localizado na região nordeste do estado e possui um importante papel econômico e social na região. Além dos depósitos minerais, o sucesso da indústria cerâmica na localidade deve-se também as malhas viárias encontradas na localidade (SILVA, 2013)

Segundo dados do Instituto do Desenvolvimento Econômico-Social do Pará (IDESP, 2013), o município de São Miguel do Guamá possui 52 mil habitantes e encontra-se localizado a 144 km da capital paraense, sua principal via de acesso à capital é a rodovia BR 316 além da BR 010. O polo cerâmico do município conta com 49 indústrias cadastradas, e juntas chegam a produzir um total de 50 milhões de peças mensalmente (RACANELLI, 2017).

Uma das principais contribuições socioeconômicas da indústria cerâmica do município de São Miguel do Guamá é a geração de emprego e renda, visto que, o município é considerado o principal polo industrial cerâmico da região norte do Brasil. A produção municipal chega a atingir 92% de tudo o que é produzido no estado, além disso é responsável pela geração de 3 mil empregos. Ademais, a maior parte do que é produzido permanece dentro do estado, com exceção de uma pequena parcela que é distribuída para o estado do Maranhão (RACANELLI, 2017).

4.2 Materiais cerâmicos

Segundo Callister (2012), material cerâmico é todo aquele que é formado por compostos metálicos e não metálicos e possui em sua estrutura, ligações químicas totalmente iônicas ou predominantemente iônicas com algum grau de covalência. Outra característica importante das cerâmicas é a necessidade de tratamento térmico em altas temperaturas para que as suas propriedades sejam atingidas (CALLISTER, 2012).

Esses materiais possuem estrutura cristalina consideravelmente mais complexas quando comparadas com os metais e seu arranjo cristalino lhe confere propriedades excelentes como elevada dureza e resistência a altas temperaturas, são também ótimos isolantes térmicos e elétricos, porém, são altamente frágeis (CALLISTER, 2012; SILVA, 2000).

Os materiais cerâmicos podem ser separados em duas classes: Cerâmicos tradicionais e cerâmicos avançados. Os materiais cerâmicos tradicionais utilizam como matéria-prima argila, feldspato e sílica. A argila é utilizada para conferir plasticidade a massa, o feldspato serve como material fundente, já a sílica colabora com o controle dimensional da peça. Por sua vez, os materiais cerâmicos avançados possuem sua estrutura composta por materiais puros ou com elevado grau de pureza, como exemplo de matéria-prima desse seguimento industrial há o óxido de alumínio (alumina – Al_2O_3), óxido de zircônio (zircônio – ZrO_2) e o carbeto de silício (SiC) (BARSOUM, 2003; CALLISTER, 2012; VLACK, 1973).

4.2.1 Blocos de Vedação

Blocos cerâmicos são materiais que apresentam coloração avermelhada e são produzidos a partir de argilas plásticas com alguma quantidade de materiais não plásticos. Esses materiais exercem função estrutural e, portanto, é necessário que haja controle na seleção das matérias-primas e na formulação dos produtos (Racaneli, 2017; Ramos, 2010)

Os blocos de vedação são conformados por extrusão e geralmente são queimados em temperaturas inferiores a 1000° Celsius. Segundo a ABNT NBR 15270-1/2017 o valor mínimo de resistência mecânica para um bloco de vedação é de 1,5 MPa.

4.2.2 Argilas

Segundo Coelho e Santos (2007) o termo argila pode ser definido como rocha composta essencialmente por argilominerais, que por sua vez são silicatos hidratados de Al, Fe e Mg e que possuem estrutura cristalina em camadas. Estes, devido sua estrutura, são comumente conhecidos como silicatos em camadas ou filossilicatos.

Para Teixeira-neto e Teixeira-neto (2009), argila pode ser definida como material de origem natural que possui como principais as características de textura terrosa, tamanho de partícula com diâmetro inferior a 2 μm e hidroplasticidade, sendo esta característica relacionada aos argilominerais presentes na estrutura da argila.

Dentre as matérias-primas cerâmicas, a mais amplamente utilizada é a argila. Este material, além de ser barato, é encontrado em abundância e pode, na maioria das vezes, ser utilizado sem qualquer beneficiamento prévio. Outra característica que torna esse material atrativo é a facilidade para realizar o processo de conformação, visto que, as argilas possuem em sua composição argilominerais, que por terem estrutura lamelar e hidrofílica tornam a argila plástica com a adição da proporção correta de água à massa (CALLISTER, 2012).

É possível dividir os produtos à base de argila em duas classes: produtos estruturais à base de argila e louças brancas. Os produtos estruturais são aqueles onde a integridade estrutural do produto é importante, enquadram-se nessa classificação os tijolos, telhas, azulejos e tubulações de esgoto. Já as louças brancas são aquelas feitas de material mais puro e desenvolvem coloração esbranquiçada após a etapa de cozimento. Se enquadram nessa classificação as porcelanas, louças de mesa, louças vitrificadas e louças sanitárias (CALLISTER, 2012).

Na indústria têxtil e de alimentos emprega-se a argila nos processos de adsorção com a finalidade de clarear as amostras. Também encontramos sua utilização em aterros sanitários e em tratamentos do solo. Outros exemplos do emprego da argila são ajuste das propriedades reológicas de tintas, cosméticos e fármacos (Teixeira-neto e Teixeira-neto, 2009).

No ano de 1985 a revista inglesa “Industrial Minerals” introduziu o termo “argilas especiais” para designar um grupo de argilas comercialmente raras. Estas ocorrem em abundância, porém, em localidades restritas, são quimicamente tratadas e devido isso possuem maior valor agregado. A maior parte dessa classe de argilas foi

desenvolvida em prol de algum produto novo ou incomum. Sua criação é baseada na estrutura e nas propriedades específicas da estrutura cristalina e da composição química dos argilominerais (COELHO e SANTOS, 2007).

A enorme variedade de argilas que são encontradas e utilizadas industrialmente possuem variações em suas propriedades devido os argilominerais presentes em sua estrutura. Esses argilominerais se diferem entre si desde a sua estrutura e podem ser separados em grupos de acordo com as características apresentadas. As principais estruturas cristalinas encontradas entre os argilominerais são estrutura do tipo 1:1 e 1:2. Como exemplo de estrutura 1:1 temos a caulinita, já como exemplo de estrutura 1:2 temos as micas.

4.2.3 Argilas da Região Norte

O crescimento acelerado da industrialização e do consumo gera altos custos para o meio ambiente. Entretanto, a consciência ambiental também tem entrado em destaque na atualidade. E sendo a indústria cerâmica uma grande consumidora de recursos naturais e altamente poluidora, o estudo dos materiais aplicados na produção é de extrema importância para a redução do desperdício e melhoria da qualidade dos produtos (ACCHAR, 2008)

Segundo dados obtidos por Lima (2000), a partir de três amostras da região de São Miguel do Guamá a fração argila das amostras analisadas se encontra dentro da faixa granulométrica adequada para a confecção de peças com boa trabalhabilidade, o que possibilita a produção de peças com estrutura adequada.

Ainda segundo dados de Lima (2000), os resultados da análise de Difração de Raio-X mostraram que os principais minerais presentes nessa argila são: Montmorilonita, Caulinita, Ilita, Quartzo e Goetita. Sendo os três primeiros argilominerais responsáveis pela fração argila do material ($< 0,002$ mm) e os dois últimos encontram-se na faixa de fração silte (0,02 a 0,002 mm).

No trabalho de Macêdo *et al.* (2011) foi investigado o comportamento da argila de São Miguel do Guamá com a incorporação de lama vermelha. As análises realizadas nesse estudo mostraram que a argila utilizada possui composição muito semelhante às das argilas encontradas na região nordeste do estado do Pará, sendo caracterizada como argila caulinítica.

No trabalho de Bettini (2007) foram realizadas análises químicas e mineralógicas na argila de São Miguel do Guamá, além destas, foram realizados ensaios físicos e mecânicos como absorção de água, porosidade aparente, retração de secagem, retração de sinterização (em três temperaturas diferentes) e flexão em três pontos. Os resultados obtidos encontraram-se dentro do padrão.

4.3 Indústria siderúrgica

A indústria siderúrgica é aquela responsável pela produção do aço. A mesma, também engloba os processos produtivos dos produtos à base de ferro (gusa, ferro esponja, semiacabados e laminados). Atualmente, a capacidade produtiva de aço no Brasil é suficiente para atender a demanda do país e para manter forte posição exportadora (IAB, 2018).

O aço, principal produto siderúrgico, é uma liga de ferro muito utilizada no cotidiano das pessoas, visto que, ele apresenta boas propriedades como ductilidade, tenacidade, resistência ao desgaste e baixo custo de produção. Essas propriedades tornam o aço um dos metais mais utilizados atualmente pela humanidade (RIZZO, 2005).

Segundo dados do Instituto Aço Brasil (IABR, 2015), foram investidos US\$ 36, 4 bilhões em prol da modernização e do aumento da produção de aço, objetivando atingir a meta de 48 milhões de toneladas de aço. Ainda de acordo com a IABR o Brasil possui o maior parque industrial de aço da América do Sul, chegando a atingir um saldo comercial de 3,6 bilhões de dólares e o consumo per capita atinge 104 kg de produtos siderúrgicos. Esse montante de aço produzido é utilizado principalmente nas indústrias civil, automobilística, de máquinas agrícolas e utilidades domésticas e comerciais.

A partir do intenso investimento nesse setor industrial e da legislação ambiental vigente é de bem notável a busca por reciclagem dos produtos gerados pela produção do aço. É notável que o crescimento da consciência ambiental contribui para todo o processo de destinação dos resíduos, desde a logística de transporte até o depósito final (RIZZO, 2005)

Segundo Takano (2000), a produção anual de resíduos atinge a marca de 30 milhões de toneladas de resíduos recicláveis. E, de acordo com o processo, podem ser gerados entre 450 e 600 kg de resíduo para produzir uma tonelada de aço. Entre

os principais resíduos descartados de maneira incorreta encontram-se as escórias de aciaria e de alto-forno. Juntas, estas correspondem a 60% do descarte inadequado e da poluição ambiental gerada pelas siderúrgicas (IABR, 2011).

4.3.1 Alto forno

O alto-forno é um equipamento largamente utilizado na metalurgia do ferro. Nele os minerais de ferro, que se encontram na forma de óxidos, são reduzidos através de um meio redutor que, geralmente, é um combustível carbonoso. O carregamento do alto-forno é feito com minério de ferro, sucata, combustível redutor e alguns aditivos (ARAUJO, 2005).

Além do aço, as siderurgias são responsáveis pela produção de alguns coprodutos que são de difícil descarte e que geram danos tanto ambientais quanto econômicos, visto que, não são utilizados em sua totalidade e demandam muito espaço para descarte. Entre esses coprodutos temos o pó de balão, escória de redução do ferro-gusa em alto-forno, e da fundição do aço em panela e refino, assim como os pós de despoeiramento e de aciaria (CASTRO, 2016).

Estima-se que são produzidos de 25 a 45 kg de pó de balão para cada tonelada de ferro-gusa. Já para escória de aciaria os dados são ainda maiores, 150 kg/ Ton. E para cada tonelada de ferro-gusa produzida, são gerados de 15 a 20 kg de pó de despoeiramento. Tendo em mente a alta quantidade gerada desses coprodutos é recomendável que haja uma aplicação para eles, evitando assim os danos ambientais e o custo de armazenamento (CASTRO, 2016).

4.3.2 Tipos de escórias

A escória é um resíduo siderúrgico oriundo da redução do ferro em alto-forno. Esta é resultado da fusão de óxido de silício (SiO_2) e de outras impurezas e que se encontram incorporadas as matérias-primas que servem como carga para o alto-forno. A massa de escória retirada do alto-forno a cada etapa de produção corresponde a 60% de tudo o que é produzido, e por possuir densidade inferior à do ferro-gusa, a escória permanece no alto-forno como matéria sobrenadante (ARAUJO, 2005; CASTELO BRANCO, 2004).

De acordo com a composição química encontrada pode-se classificar as escórias como escória ácida e escória básica (JOHN, 1995). Segundo Callister (2012),

escórias ácidas são aquelas que apresentam alto teor de SiO_2 . Por sua vez, as escórias básicas que apresentam em sua composição alto teor de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO).

A temperatura em que a escória é removida do alto-forno varia em torno de 1350° e 1500° Celsius, e sua energia térmica de saída é em média 1700 kJ/ kg. Quando essa escória é submetida a um processo de resfriamento lento essa energia é perdida para o ambiente e liberada através da cristalização. Nos casos onde a escória sofre resfriamento brusco forma-se um material vítreo, este apresenta um nível de energia maior do que a escória cristalina, já que ela armazena a energia de cristalização. Entretanto, as escórias vítreas apresentam menos estabilidade do que as cristalinas (JOHN, 1995).

4.4 Resíduos

Hoje é possível notar um crescimento mundial da consciência ambiental nas nações. As leis ambientais têm se tornado cada vez mais fortes, mais presentes e mais efetivas, fazendo com que as empresas precisem criar alternativas para o descarte dos seus produtos e dos resíduos de sua produção (ACCHAR, 2008).

Segundo Souza (2007), resíduos industriais podem ser definidos como qualquer material que se encontra tanto em estado sólido quanto líquido e que seja resultado de processos de fabricação, processos de transformação da matéria, processo de limpeza entre outros, e que após seu prazo de vida útil seja direcionado ao abandono.

No Brasil, encontra-se em vigor a lei nº 12.305/10 que instituiu a política nacional de resíduos sólidos. Esta surgiu com o intuito de enfrentar os principais problemas ambientais, sociais e econômicos oriundos do descarte inadequado de resíduos sólidos. Veio ainda com a proposta de aumentar a reciclagem dos resíduos e desenvolver um consumo mais consciente. Desde então, com a instituição da responsabilidade compartilhada as empresas passam a ter responsabilidade com todos os produtos gerados na sua empresa. Portanto, é essencial que cada empresário desenvolva alternativas para o descarte dos resíduos de sua produção.

4.4.1 Resíduos sólidos

De acordo com a associação brasileira de normas técnicas (ABNT) agregada ao conselho nacional do meio ambiente (CONAMA) resíduo sólido pode ser definido como material residual, em estado sólido ou semissólido, oriundo de atividades antrópicas sendo estas de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola etc.

Ademais, os resíduos, podem ser classificados de acordo com a sua toxicidade e com os danos ambientais e socioambientais que estes podem causar. Existem duas classificações para os resíduos de acordo com a sua periculosidade: Classe I e Classe II. Os resíduos considerados Classe I são aqueles mais perigosos e precisam apresentar como pelo menos uma de suas características corrosividade, toxicidade, inflamabilidade, reatividade e patogenicidade. Já os resíduos Classe II são aqueles biodegradáveis, combustíveis ou solúveis em água (BARTOLOMEU e CAIXETA FILHO, 2011).

4.4.2 Efeito da incorporação de resíduos da indústria cerâmica

Durante anos a incorporação de resíduos em matriz cerâmica vem sendo estudada, e notou-se que em muitos casos a adição dos resíduos não causou nenhum efeito deletério nas propriedades mecânicas das cerâmicas. Fato esse que torna a indústria cerâmica uma das mais promissoras para a reciclagem de resíduos sólidos industriais (ACCHAR, 2008).

Morais *et al* (2016) estudou a incorporação de resíduos de vidro de lâmpada fluorescente em matriz argilosa. Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram que a incorporação desse resíduo é viável e traz benefícios para os corpos cerâmicos.

Outro resíduo utilizado na produção de corpos cerâmicos é o resíduo de mármore e granito. Os corpos de prova obtidos a partir dessa mistura apresentaram características refratárias, fato que torna esse material mais competitivo e de maior valor agregado, além de contribuir para a redução do consumo de matéria-prima (BILDHAUER *et al.* 2015).

Além desses, muitos outros resíduos são utilizados em estudos semelhantes como lodo de gemas (BRUXEL *et al.*, 2012), chamote e argilito (CANDIDO, 2013), rochas ornamentais provenientes do tear de fio diamantado (TAGUCHI *et al.*, (2014)

e etc. Fazendo com que a indústria cerâmica seja uma das principais rotas para reutilização de resíduos sólidos industriais.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais utilizados

As matérias-primas utilizadas foram: escória de alto-forno e duas argilas, sendo uma forte e uma fraca, ambas cedidas pela empresa Menegalli, situada no município de São Miguel do Guamá. Assim que foram coletados, os materiais seguiram para o beneficiamento que foi realizado na Usina de Materiais (USIMAT) da Universidade Federal do Pará.

5.2 Metodologias empregadas

As etapas de processamento foram:

1. Beneficiamento das matérias-primas
2. Caracterização das matérias-primas
3. Formulação das massas
4. Conformação dos corpos de prova
5. Sinterização dos corpos de prova
6. Determinação das propriedades físicas e químicas da cerâmica
7. Análise microestrutural

5.2.1 Beneficiamento das matérias-primas

As matérias-primas foram secas em estufa na temperatura de 110° C por 24 h. Em seguida os materiais foram desagregados em moinho de bolas por 30 minutos. Após a etapa de desagregação os materiais foram passados na peneira de 80 mesh para uniformização do tamanho de partícula.

5.2.2 Caracterização das matérias-primas

Nessa etapa foram determinadas as propriedades químicas e mineralógicas das matérias-primas. A caracterização química foi determinada através da análise de Fluorescência de Raio X (FRX). Já as propriedades mineralógicas foram determinadas por Difração de Raio X (DRX). A caracterização morfológica foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

5.2.2.1 Análise química

A composição química dos materiais foi analisada por Espectrometria de Fluorescência de Raio-X (FRX), utilizando um espectrômetro WDS sequencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical, com tubo de Raio X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW. Esse ensaio foi realizado no laboratório de caracterização mineral da Universidade Federal do Pará.

5.2.2.2 Difração de Raios-X

A Difração de Raio-X foi realizada em difratômetro Enpyream da marca PANalytical com tubo de Raio-X cerâmico com anodo de Co. Este foi operado a 40 kV e 40 mA, comprimento de onda de $K\alpha_1 = 1,78901 \text{ \AA}$. As amostras foram analisadas em um intervalo de 2θ entre $4-95^\circ$, com um passo angular de $0,026^\circ$ e tempo de passo de 30 s.

5.2.3 Formulação das massas argilosas

Foram preparadas 3 formulações com adição de 0, 5 e 10% em peso de escória de alto-forno em massa argilosa composta por uma argila forte e uma argila fraca em uma proporção de 1:1.

A Tabela 5.1 apresenta as composições em porcentagem das matérias-primas utilizadas.

Tabela 5.1: Composição em peso das matérias-primas utilizadas.

Composições	Matérias-primas (% em peso)		
	Argila Forte	Argila Fraca	Escória de alto-forno
0%	50	50	0
5%	47,5	47,5	5
10%	45	45	10

Fonte: Autor, 2019

A homogeneização das massas foi realizada em moinho de bolas da marca WORK INDEX, série 005, por 30 minutos. A Figura 5.1 apresenta o equipamento utilizado na preparação das massas. E em seguida o material foi peneirado a 80 mesh e condicionado em saco plástico.

Figura 5.1: Moinho de bolas utilizado para homogeneizar as massas



Fonte: Autor, 2019.

5.2.4 Plasticidade

O ensaio de plasticidade realizou-se no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPA para as formulações acima citadas. A plasticidade foi determinada através dos limites de Atterberg de acordo com as normas da ABNT NBR-7180 (ABNT, 1984a) e ABNT NBR (ABNT, 1984b).

O índice de plasticidade de (IP) Atterberg é dado pela seguinte equação:

$$IP = LL - PL \quad (5.1)$$

em que:

IP= índice de Plasticidade;

LL= Limite de Liquidez;

PL= Limite de Plasticidade.

5.2.5 Umidificação da massa

Após a etapa de preparo as massas foram umedecidas com 8% de água e homogeneizadas manualmente. Seguidamente foram preparados 8 corpos de prova para cada composição.

5.2.6 Conformação dos corpos de prova

Assim que foi finalizado o processo de homogeneização das massas os corpos de prova foram prensados uniaxialmente em matriz prismática pesando 80 g cada um. As dimensões da matriz são de aproximadamente 10,0 x 5,0 x 1,0. O equipamento utilizado na conformação é uma prensa hidráulica manual Karl Kolb scientific technical Supplies D-7062 de fabricação alemã com a aplicação de uma força de 100 KN.

A Figura 5.2 apresenta o equipamento de prensagem e a matriz de conformação.

Figura 5.2: Prensa hidráulica (a) e Molde de aço (b)



Fonte: Autor, 2019

5.2.5.1 Secagem dos materiais

Logo após a conformação todos os corpos de prova foram levados a estufa e mantidos por 24 h a uma temperatura de 110° C. Assim que finalizada a etapa de secagem as dimensões de cada um dos corpos de prova foi medida para posteriormente realizar-se o cálculo de retração linear de secagem.

5.2.5.2 Sinterização dos corpos de prova

O processo de sinterização dos corpos de prova se deu em um forno do tipo mufla, Elebttro Lim Elektro Therm. Nas temperaturas de 900 e 1000° C.

O resfriamento dos corpos de prova se deu por convecção natural. A Figura 5.3 apresenta alguns corpos de prova após a queima.

Figura 5.3: Corpos de prova após a queima



Fonte: Autor, 2019

5.2.6 Determinação das propriedades físicas

Após a sinterização foram realizados os ensaios de absorção de água (%), porosidade aparente (%), massa específica aparente (g/cm³) e flexão em três pontos.

5.2.6.1 Absorção de água

Calculou-se a absorção de água através da equação (5.3):

$$AA(\%) = \frac{(Mu - Ms)}{Ms} \times 100 \quad (5.3)$$

em que Mu corresponde a massa úmida em gramas e Ms a massa seca, também em gramas.

5.2.6.2 Porosidade aparente

Para medir a porosidade aparente foi utilizada a equação 5.2:

$$PA(\%) = \frac{(Mu - Ms)}{(Mu - Mi)} \times 100 \quad (5.2)$$

em que M_u , M_s e M_i correspondem respectivamente a massa úmida, massa seca e massa imersa do corpo de prova, estas medidas em gramas (g).

5.2.6.3 Massa específica aparente

Para calcular a massa específica aparente utilizou-se a equação 5.4:

$$MEA(\frac{g}{cm^3}) = \frac{M_s \times \rho_L}{(M_u - M_i)} \quad (5.4)$$

em que M_u , M_s e M_i são respectivamente massa úmida, massa seca e massa imersa medidas em gramas (g). Já ρ_L é a massa específica da água dada em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3).

5.2.6.4 Tensão de ruptura a flexão

Segundo ABNT NBR 15270-1:2017 a tensão mínima de ruptura a flexão para blocos de vedação é de 1,5 MPa. O cálculo para se obter a tensão de ruptura a flexão obedece a equação 5.5:

$$\sigma_{rf} = \frac{3F_f L}{2bd^2} \quad (5.5)$$

em que F_f é a carga na fratura, L é a distância entre os pontos de apoio e b e d correspondem a largura e altura do corpo de prova respectivamente.

5.2.6.5 Análise morfológica

Os corpos de prova sinterizados tiveram sua morfologia analisada por Microscopia Eletrônica de Varredura.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

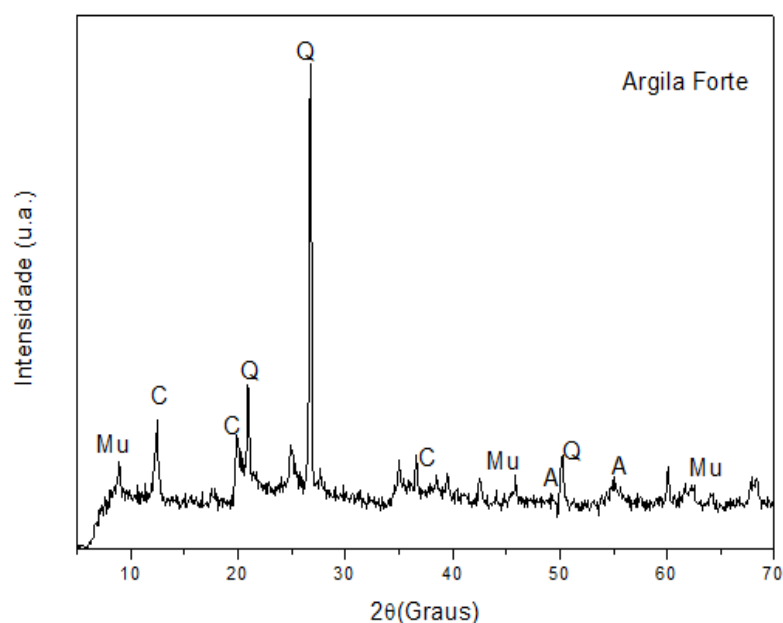
6.1 Caracterização das matérias-primas

6.1.1 Caracterização mineralógica

Difratometria das matérias-primas

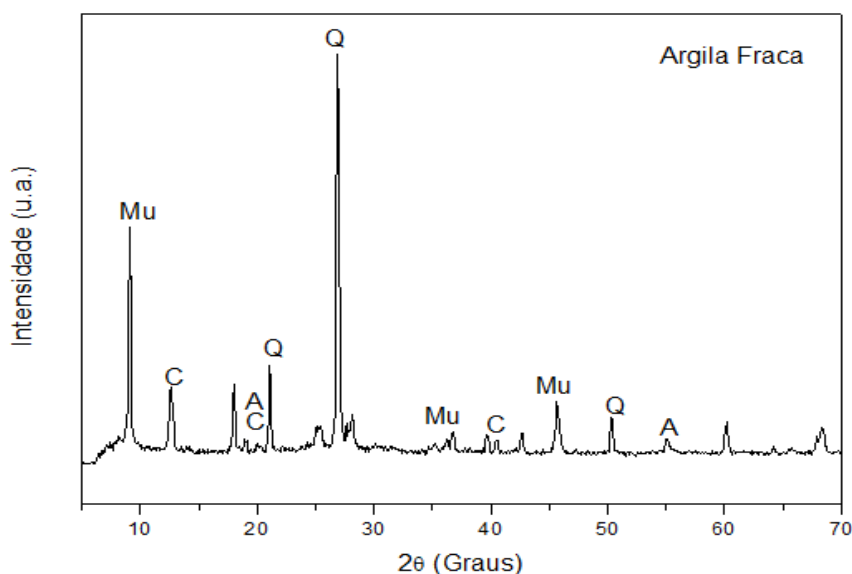
As Figuras 6.1 e 6.2 correspondem, respectivamente, as difratometrias da Argila Forte e Argila Fraca. Na Figura 6.1 estão representadas as fases cristalinas, estas correspondem aos minerais caulinita, quartzo, mica muscovita e anatásio. Entre esses, os picos mais proeminentes estão relacionados ao quartzo (SiO_2) e a caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Figura 6.1: Difratograma de Raios X da Argila Forte. C = caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A = anatásio



Fonte: Autor, 2019

Figura 6.2: Difratograma de Raios X da Argila Fraca. C = Caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A = anatásio.



Fonte: Autor, 2019.

Estudos realizados por Lima (2000) e Macêdo (2011) mostraram semelhanças com os resultados desse estudo. Ainda no trabalho desses autores, os picos de maior intensidade apresentado pelo Difratograma foram os de caulinita e quartzo, sendo a caulinita o principal argilomineral presente nas argilas estudadas.

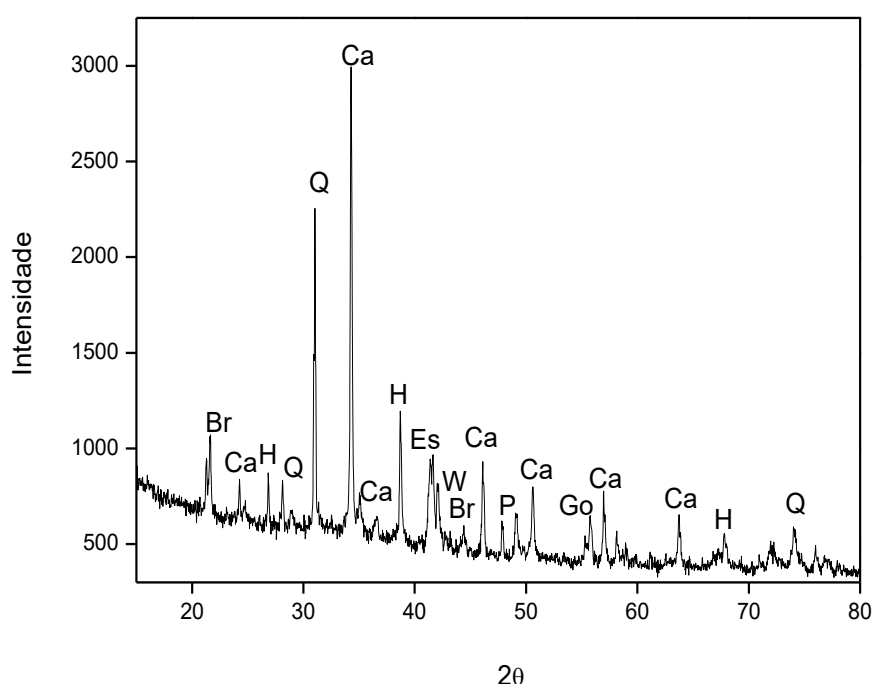
Além de ser responsável pela plasticidade conferida a massa argilosa o argilomineral caulinita é responsável por outra característica importante nas cerâmicas, a refratariedade (VIEIRA, *et al* 2007). De modo que, materiais refratários produzidos a partir de argilas caulíníficas possam ser utilizados a temperaturas na faixa de 1200 a 1350° C (ABAJO, 2000).

Já o quartzo, presente na argila, é a principal impureza e atua como matéria-prima inerte durante o processo de sinterização. O quartzo é também responsável pelo controle dimensional da peça, evitando assim, uma alta retração de sinterização. A Mica muscovita pode atuar como material fundente, contribuindo com a formação da fase líquida devido a presença de óxidos alcalinos em sua estrutura (RIBEIRO, 2010).

Na figura 6.3 está apresentado o Difratograma de Raios X da Escória de Alto-Forno. Nota-se que no resíduo as fases cristalinas presentes são calcita, quartzo, hematita, goetita e minerais esmectínicos.

A calcita presente na amostra pode atuar como material fundente quando presente em baixas concentrações. Quanto aos minerais hematita e goetita, eles conferem a cor avermelhada a peça queimada já que estão associados ao ferro (CANDIDO, 2013). Os minerais esmectínicos possuem alta plasticidade e contribuem para o aumento dela na massa cerâmica (RAMOS, 2010)

Figura 6.3: Difratograma de Raios X da Escória de Alto-Forno. Ca = calcita; Q = quartzo; H = Hematita; Go = goetita; Es = minerais esmectínicos; Br = brucita.



Fonte: Autor, 2019

6.1.2 Caracterização química

Fluorescência de Raios X

A análise de FRX foi realizada com o objetivo de avaliar os teores de óxidos que compõe as amostras do estudo, além disso, essa análise serve como complemento para outras análises já realizadas. A Tabela 6.1 representa a composição química (expressa em termos dos percentuais dos óxidos equivalentes) dos materiais utilizados nesse estudo.

Tabela 6.1: Composição química das matérias-primas estudadas.

Composições	Matérias-Primas		
	Argila Forte	Argila Fraca	Escória
SiO ₂	46,42	62,80	20,70
Al ₂ O ₃	27,90	21,50	6,38
Fe ₂ O ₃	4,23	4,56	20,10
TiO ₂	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
K ₂ O	3,67	0,07	0,48
SO ₃	-	-	0,46
ZnO ₃	-	-	0,58
Cr ₂ O ₃	-	-	0,15
PF	11,96	9,89	16,94

Fonte: Autor, 2019

Os resultados mostram semelhanças na composição química entre as duas argilas. Além disso, nota-se que os principais componentes delas são alumínio e silício estes encontram associados a aluminossilicatos como caulinita e minerais esmectífticos.

Segundo Santos (1989), existem argilas com teor de alumínio superior a 39,8% caracterizando um material altamente aluminoso e apropriado para produção de materiais refratários. Apesar de as argilas de São Miguel do Guamá apresentarem valores de Al₂O₃ inferiores a 39,8% o percentual delas é considerado alto.

Os valores obtidos para K₂O e MgO são considerados valores traços, essa fração diminuta de óxidos fundentes dificulta o processo de formação de fase vítrea e por consequência a densificação das peças queimadas. A PF nas argilas está relacionada a queima da matéria orgânica e a perda de água estrutural presente nos aluminossilicatos (CANDIDO, 2012).

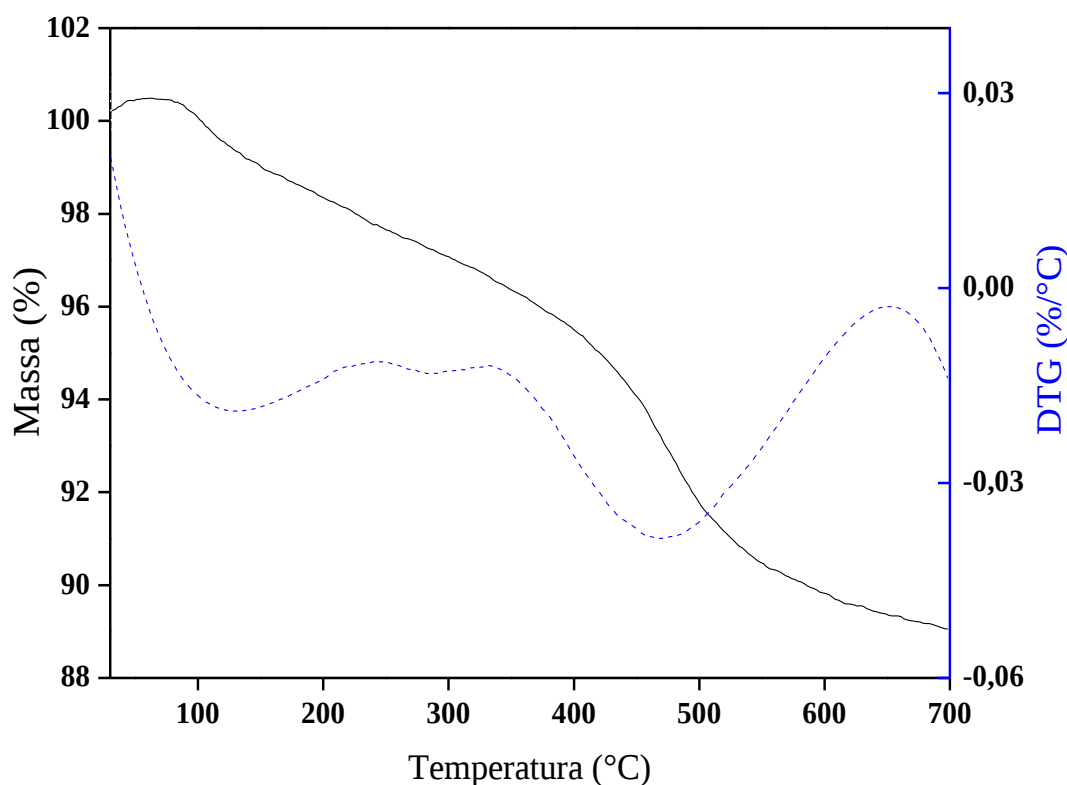
A Escória de alto forno apresenta valores altos para óxidos de ferro, essa característica confere maior intensidade na coloração avermelhada das peças queimadas. Nota-se também que a escória apresenta teores maiores de MgO quando comparada as argilas, este fato contribui com a densificação das peças durante a etapa de queima. A perda ao fogo na escória está relacionada a decomposição de matéria orgânica e perda de água (LIZARAZO,2016).

6.1.3 Análise Termogravimétrica

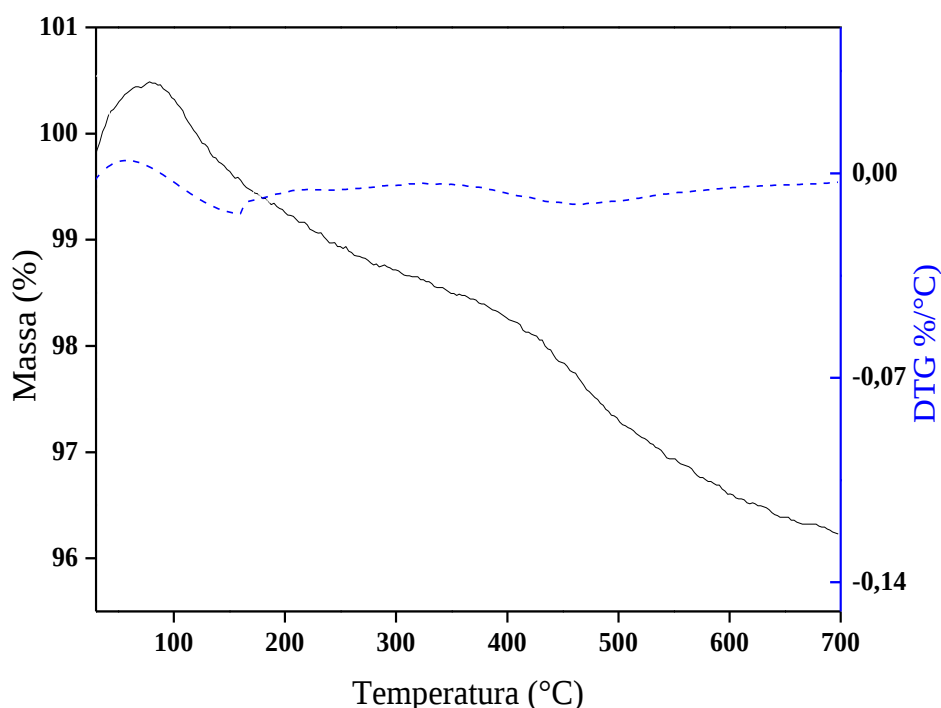
A análise térmica é um estudo que possibilita verificar o comportamento do material quando submetido ao aquecimento. Essa análise serve como complemento ao DRX visto que é possível associar os picos com o comportamento térmico dos minerais que se encontram na amostra. As figuras 6.4 e 6.5 apresentam as curvas de TG e DTG das argilas forte e fraca, respectivamente.

O primeiro pico ocorre por volta de 100°C e está associada a perda de água superficial tanto na argila forte quanto na fraca. Para a argila forte, nota-se a presença de uma perda de massa por volta de 300°C, essa perda encontra-se possivelmente associada à decomposição da matéria orgânica dessa amostra. Quando a análise atinge uma temperatura em torno de 500°C observa-se outro pico, este está associado ao início da transformação de caulinita em metacaulinita (Acchar, 2009).

Figura 6.4: Curvas de TG e DTG da argila forte



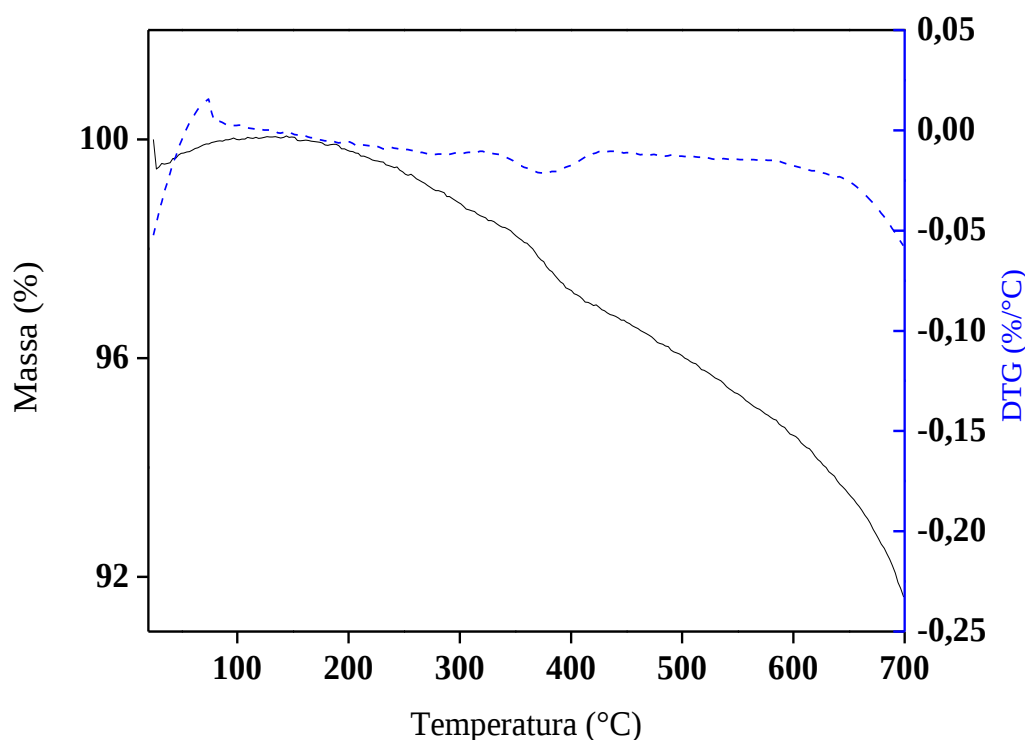
Fonte: Autor, 2019

Figura 6.5: Curvas de TG e DTG da argila Fraca

Fonte: Autor, 2019

A figura 6.6. apresenta as curvas de TG e DTG para a escória de alto forno. O primeiro pico encontrado por volta de 100° C no termograma está associado a perda de água da amostra. O pico seguinte, aproximadamente em 400° C, está possivelmente associado com a decomposição da calcita e as reações de oxidação do Fe (VIEIRA, 2007).

Comparando os resultados obtidos para ambas as argilas se nota uma diferença da perda de massa durante o aquecimento, este resultado afirma o resultado obtido por difração de Raios X. Essa diferença ocorre devido a diferença de composição das argilas, a argila forte apresenta uma maior fração de finos e um maior teor de matéria orgânica, portanto o resultado de DTG mostra uma perda de massa a 400°C que não ocorre na argila fraca devido seu maior teor de SiO₂ que é um estabilizante estrutural.

Figura 6.6: Curvas de TG e DTG da Escória de Alto-Forno

Fonte: Autor, 2019

6.2 Propriedades físicas e mecânicas

6.2.1 Plasticidade

Segundo Almeida (2009), a plasticidade é uma importante propriedade das argilas e é responsável pela capacidade da argila de ser conformada por extrusão. Sendo esse o processo de produção de muitos materiais de cerâmica tradicional.

A Tabela 6.2 apresenta os valores de Limite de Plasticidade (LP), Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP). Sendo que LP indica qual o mínimo de água que deve ser adicionada a massa para que seja possível conformá-la, LL indica a quantidade máxima de água que a massa pode absorver enquanto encontra-se moldável e IP indica a diferença entre LL e LP, ou seja, a faixa de consistência plástica.

Tabela 6.2: Limite de Atterberg das amostras

Composições	Limite de Plasticidade (%)	Limite de Liquidez (%)	Índice de Plasticidade (%)
100FO	35,64	57,94	22,30
100FR	30,66	41,49	10,83
50FO50FR	20,59	41,40	20,81
10ES40FO40FR	40,66	20,88	19,78

Fonte: Autor, 2019

A formação 100% Argila Forte (100FO) apresenta valores muito elevados de plasticidade enquanto a formulação 100% Argila Fraca (100FR) mostra valores consideravelmente inferiores. Esse resultado já era esperado visto que a Argila Forte apresenta maior concentração de argilominerais em sua estrutura (CANDIDO, 2012; RACANELI, 2017). Por isso foi utilizado nesse trabalho a mistura entre as duas argilas em uma proporção de 1:1 em cada formulação.

Os resultados obtidos para a formulação 10% Escória (10ES40FO40FR) mostram que a massa obtida se mantém dentro dos padrões aceitáveis para cerâmica vermelha. Isso devido ao caráter não plástico da Escória que ajuda a melhorar a trabalhabilidade das massas (CANDIDO, 2012).

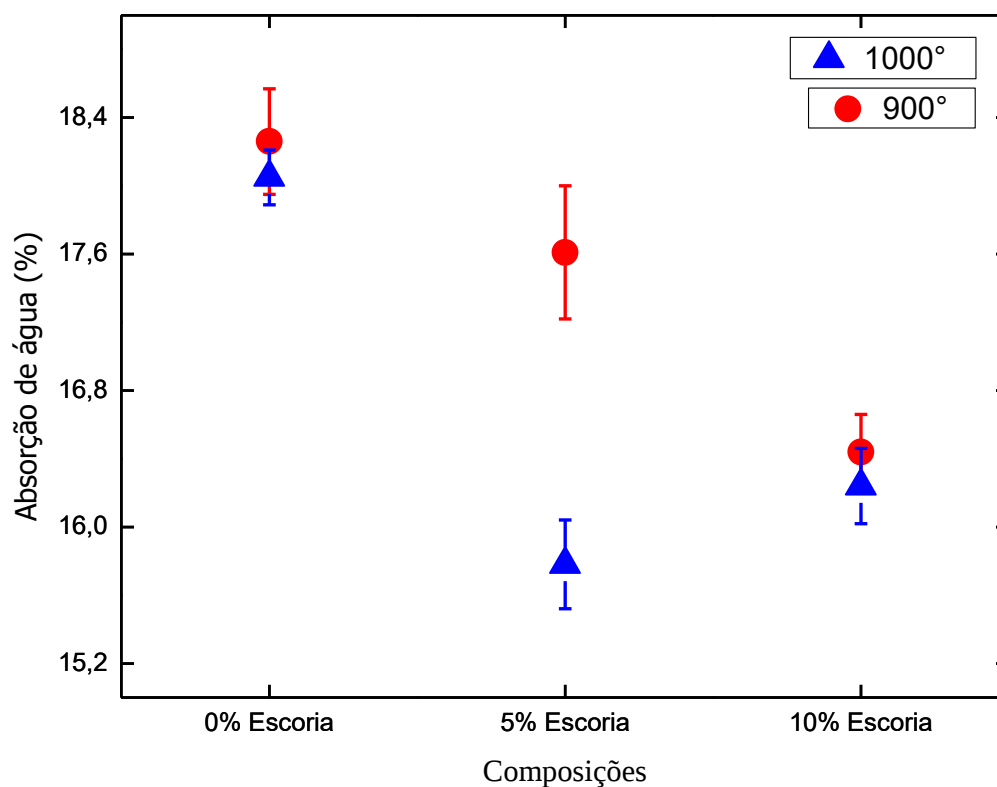
6.2.2 Absorção de água

A Figura 6.7 apresenta o comportamento de absorção de água das peças cerâmicas sinterizadas. Como pode ser observado, todas as amostras obtiveram resultados de absorção inferior a 22% que é o limite máximo estabelecido pela norma NBR 15270-1/2017 para blocos de vedação. Os corpos de prova formulados com 100% de argila, ou seja, 0% de escória apresentaram os maiores valores de absorção de água. Esse comportamento pode estar relacionado com a composição química das argilas, visto que, não apresentam em sua composição um volume considerável de óxidos fundentes e, portanto, demandam de maior temperatura de queima para que ocorra o fechamento dos poros.

Os corpos de prova com adição do resíduo apresentaram queda na absorção de água. Esse dado pode estar associado ao fato de a escória contribuir para formação de fase líquida durante a sinterização, além disso, em temperaturas mais altas ocorre o maior crescimento dos grãos. Nota-se ainda que as amostras expostas a 1000°C apresentam menores percentuais de absorção de água uma vez que nessa

temperatura há uma tendência ao fechamento dos poros, pois a formação de fase líquida é mais eficiente.

Figura 6.7: Absorção de água das cerâmicas queimadas a 900 e 1000°C. Com adição de 0%; 5% e 10% em peso de Escória.

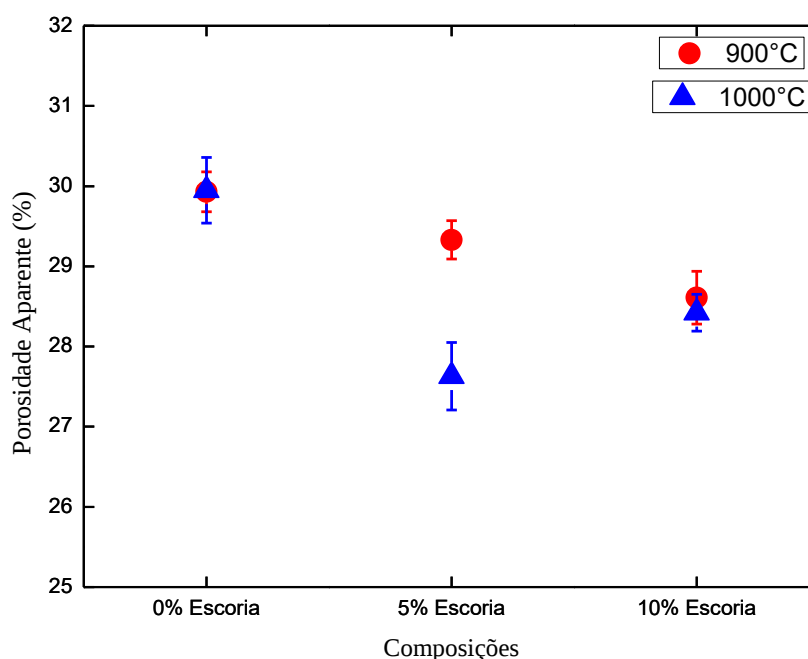


Fonte: Autor, 2019.

6.2.3 Porosidade Aparente

A Figura 6.8 apresenta os resultados obtidos para a porosidade aparente das peças cerâmicas queimadas a 900 e 1000°C.

Figura 6.8: Porosidade Aparente. 0%Escória; 5% Escória; 10%Escória



Fonte: Autor, 2019

O padrão apresentado confirma os resultados de absorção de água, indicando que a composição 0% apresenta maior absorção, pois, provavelmente, apresenta-se mais porosa. Esse resultado pode estar relacionado a característica refratária dessas argilas, para alcançar uma estrutura mais densa e, por conseguinte, menor porosidade seria necessária uma queima a temperaturas superiores a 1050°C (RACANELI, 2017).

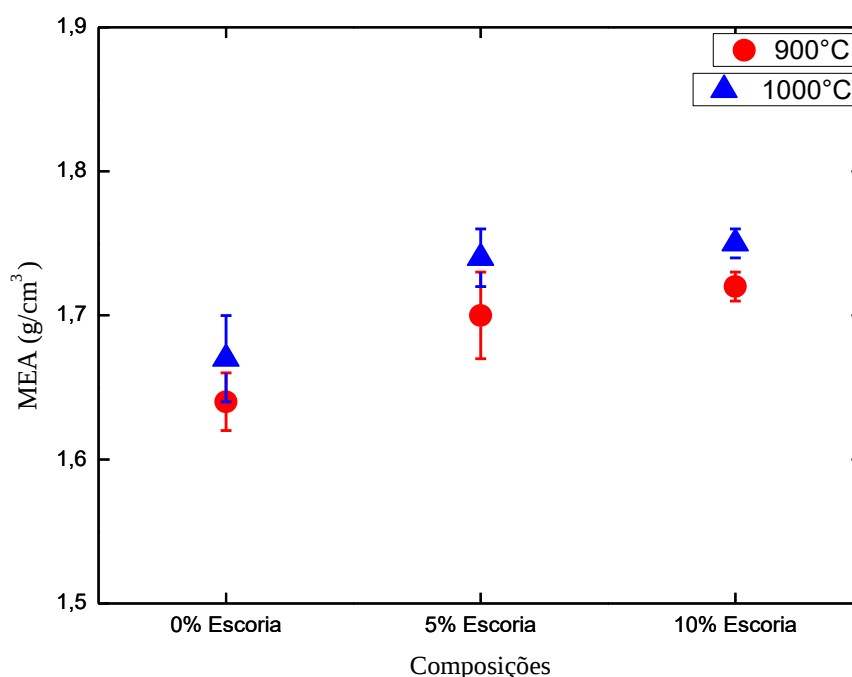
Os melhores resultados foram obtidos pela formulação com adição de 5% de escória. Esse resultado mostra que houve boa interação entre a matriz cerâmica e o resíduo, e que a escória possibilitou a maior formação de fase vítrea durante a queima. O aumento da porosidade e da absorção de água encontrados nos gráficos podem estar relacionados com a presença de partículas grosseiras que foram encontradas durante a análise morfológica apresentada posteriormente. Apesar desse acréscimo da porosidade na formulação com 10% de escória, todos os resultados permaneceram inferiores a 35%, valor máximo para cerâmica vermelha proposto por SANTOS (1989).

6.2.4 Massa específica aparente

Segundo Santos (1989), o valor máximo de densidade para as peças cerâmicas é de 2,7%. Todas as formulações estudadas permaneceram dentro do patamar esperado.

A Figura 6.9 apresenta a massa específica aparente das três composições.

Figura 6.9: Massa específica aparente. 0%Escória; 5% Escória; 10%Escória



Fonte: Autor, 2019.

As cerâmicas tendem a apresentar um aumento na massa específica quando ocorre um bom empacotamento na etapa de conformação. Esse empacotamento pode trazer benefícios as peças já que pode favorecer a adesão das partículas e assim melhorar as propriedades tecnológicas da cerâmica. Nota-se que houve uma variação pouco considerável nas peças queimadas a 900 e 1000°C já que os resultados se mostraram aproximadamente dentro de um mesmo desvio padrão (CANDIDO, 2012).

6.2.5 Resistência a flexão

É de grande importância que todo o material que será submetido a esforços mecânicos seja analisado e ensaiado para que suas propriedades sejam compatíveis com as normas vigentes e para evitar que esse material apresente falha durante o seu uso e acarrete perdas materiais e humanas.

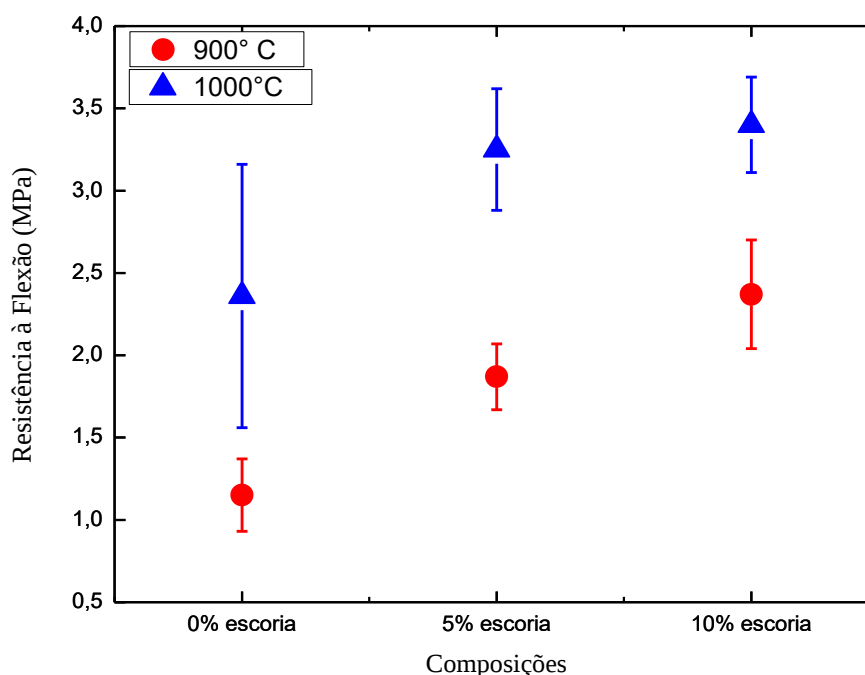
O ensaio de resistência a flexão é amplamente utilizado para mensurar a resistência mecânica das peças cerâmicas. Segundo a norma ABNT NBR 15270-1: 2017 a resistência mínima para blocos de vedação é de 1,5 MPa.

A Figura 6.10 apresenta a resistência à flexão das peças com adição de 0, 5 e 10% em peso de escória em função da temperatura. Observa-se que apenas a formulação com 0% de escória e queimada a 900°C apresentou valores de resistência a flexão inferior a 1,5 MPa. Esse padrão confirma o resultado de absorção de água indicando que a escória contribui para o fechamento da porosidade durante a etapa de queima e, conseqüentemente, melhora os valores de resistência à flexão. Portanto pode-se afirmar que, em sua maioria, os resultados obtidos nesse estudo encontram-se dentro dos valores esperados.

Nota-se ainda que os corpos de prova queimados a 1000°C apresentaram valores de resistência mecânica consideravelmente superiores quando comparados aos de 900° C. Esse resultado está possivelmente atrelado a melhor formação de fase líquida obtida na temperatura de 1000°C, sendo esta responsável pelo coalescimento dos grãos cerâmicas pela diminuição da porosidade das amostras e pelo aumento da resistência mecânica (Pinheiro, 2010).

Os resultados mostram ainda que com o aumento da adição de escória de alto forno houve um acréscimo considerável na resistência a flexão das peças queimadas tanto a 900 quanto a 1000°C. Esse dado confirma a boa interação entre a matriz e o resíduo e mostra que essa incorporação favoreceu a formação de fase líquida (CANDIDO, 2012). Os melhores resultados foram obtidos para as peças queimadas a 1000°C onde a resistência a flexão atingiu valores de até 3,7 MPa.

Figura 6.10: Resistência à Flexão. 0% escória, 5% escória e 10% escória.



Fonte: Autor, 2019.

6.3 Caracterização das peças queimadas

6.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 6.11 apresenta as micrografias obtidas por MEV das peças com adição de 0, 5 e 10% de escória de alto forno, queimadas a 1000°C.

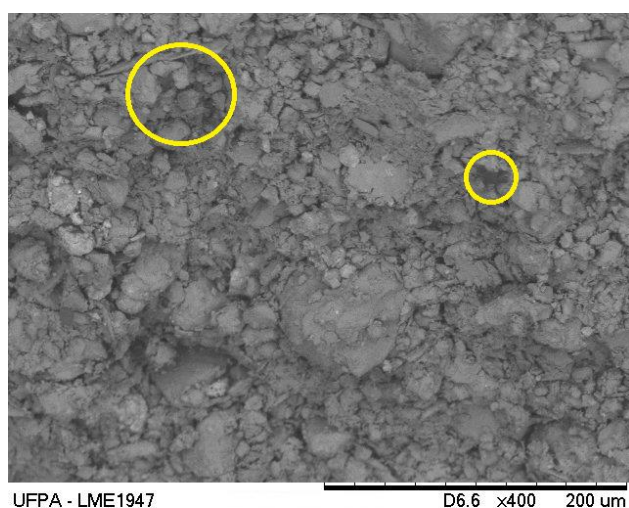
A figura 6.11 (a) apresenta a micrografia obtida por MEV da formulação com adição de 0% de escória, nessa figura observa-se uma uniformidade nas partículas e a presença de porosidade, representada pelos círculos amarelos, oriunda do processo de sinterização.

Já na imagem (b) nota-se a presença de partículas escurecidas, destacadas pelo quadrilátero vermelho, possivelmente associadas a escória de alto forno, visto que na amostra sem adição de escória essas partículas não foram encontradas. Observa-se ainda a presença de poros nessa amostra, marcados pelos círculos amarelos.

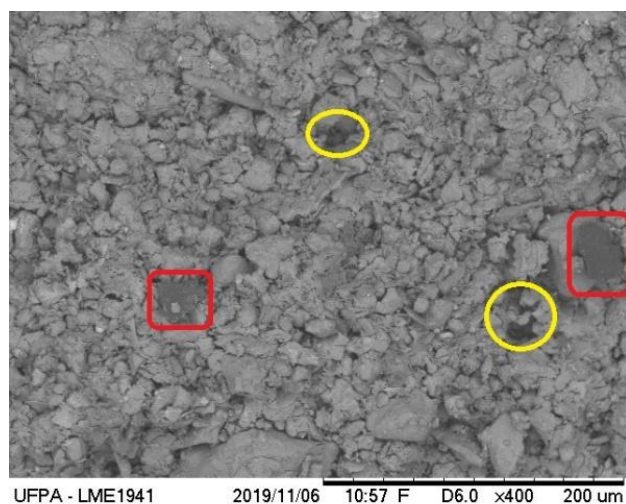
Com relação a Imagem (c) observa-se uma discrepância no tamanho de algumas partículas, destacada pela seta azul, a presença dessas partículas pode estar vinculada ao aumento do percentual de absorção de água e porosidade aparente

obtidos para as peças com adição de 10% escória. Essas regiões, onde encontra-se partículas com maior tamanho, são regiões onde ocorre acúmulo de tensões e o aumento da presença de porosidade já que essas partículas dificultam a compactação das amostras no processo de conformação. Encontra-se também nessa imagem a presença de partículas escurecidas, destacadas pelo quadrilátero vermelho, possivelmente associadas a escória de alto forno. Ademais a figura (c), assim como as demais apresenta a presença de porosidade, indicada pelo círculo em amarelo (VIEIRA, 2007; RACANELLI, 2017).

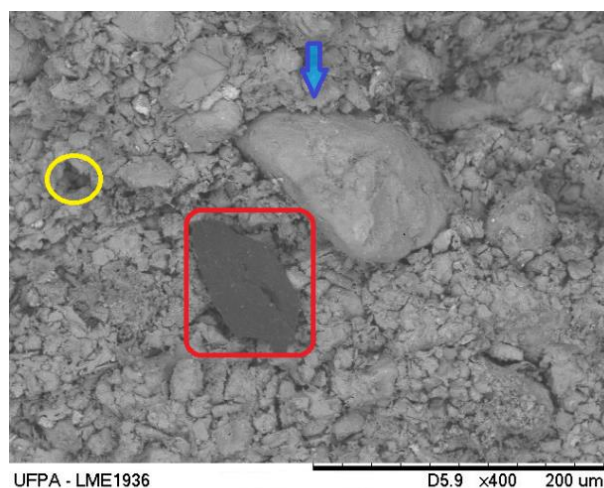
Figura 6.11: Micrografias obtidas por MEV das peças com adição de 0 (a), 5 (b) e 10% (c) em peso de escória, queimadas a 1000°C.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor, 2019.

Assim, o estudo da incorporação da escória em matriz argilosa mostrou que esse resíduo pode contribuir para melhorar as propriedades químicas, físicas e mecânicas das cerâmicas queimadas além de gerar economia de matéria-prima, uma vez que há substituição de argila por resíduo. Adicionalmente, essa incorporação contribui para um descarte ambiental correto colaborando para minimizar os impactos gerados pela produção do aço no estado do Pará.

7. CONCLUSÕES

Tendo em base os resultados obtidos pelos procedimentos experimentais realizados pode-se concluir que:

A etapa de caracterização mostrou que ambas as escórias são constituídas essencialmente por caulinita, quartzo, mica muscovita e anatásio. Já a análise mineralógica da escória de alto forno revelou a presença dos minerais calcita, quartzo, hematita, goetita, brucita e minerais esmectíticos.

Ouve uma boa adesão entre a matriz cerâmica e a escória de alto forno. Os resultados de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente ficaram dentro dos limites esperados para a produção de blocos de vedação.

Os corpos de prova com adição de escória queimados a 900° C apresentaram propriedades mecânicas e de absorção de água compatíveis com a aplicação sugerida. Portanto, é possível produzir blocos de vedação com propriedades satisfatórias a partir das formulações estudadas no presente trabalho com temperatura de queima de 900°C.

As melhores propriedades tecnológicas foram obtidas para as peças sinterizadas a 1000°C com adição de escória.

Ademais, pode-se afirmar que a escória de alto forno possui potencial para a produção de blocos cerâmicos, visto que, a sua incorporação na massa argilosa agregou positivamente nas propriedades tecnológicas das peças queimadas. Principalmente aquelas com maior temperatura de queima.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Adição de maiores concentrações de escória de alto forno.
- Aumento da temperatura de sinterização.
- Realização de DRX para a peça queimada
- EDS na região da fratura
-

REFERÊNCIAS

ABAJO, M. P. Manual sobre fabricacion de baldosas tejas y ladrillos. Ed. Baralmar S.A., Terrassa, Espanha, p. 360, 2000.

ACCHAR, W.; RULFF, B. M.; SEGADÃES, A. M. Effect of the incorporation of a spent catalyst reject from the petroleum industry in clay products. **ELSEVIER Applied Clay Science** v. 42, p. 657-660, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 6459 **Determinação do limite de liquidez: método de ensaio**. Rio de Janeiro, (1984).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7180 **Determinação dos limites de plasticidade: método de ensaio**. Rio de Janeiro, (1984).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 15270/2017: **Componentes cerâmicos. Parte 1: blocos cerâmicos para alvenaria de vedação: terminologia e requisitos**. Rio de Janeiro, 2005. 11p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. **Anicer, dados do setor**. Disponível em: www.anicer.com.br. Acessado em 16 de abril de 2019.

ARAUJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. 2.ed. São Paulo: Editora arte & ciência, 2005.

BARTOLOMEU, D.; CAIXETA-FILHO, J. **Logística ambiental de resíduos sólidos**. São Paulo: Atlas, 2011.

BETINI, Daniele Gioppo. **Inovação na tecnologia de produtos de cerâmica vermelha com uso de chamote em São Miguel do Guamá**. Dissertação de mestrado, programa de pós-graduação em engenharia civil, UFPA, 2007.

BILDHAUER, D. C. et al., Tijolos maciços com características refratárias a partir da incorporação de resíduo de mármore e granito. **Revista Liberato**, novo Hamburgo, v. 16, n. 25, 2015.

BRAGA, W. A.; SANTOS, M. W. L.; SALES, J. C. Qualidade na indústria cerâmica de vermelha: Medidas e alternativas para o controle dimensional. **Cerâmica industrial**, v. 20, 2016.

BRUXEL, F. R. **A problemática dos resíduos provenientes do setor de gemas: avaliação da incorporação de lodo de gemas na massa cerâmica**. 2012. 64 f. Dissertação (mestrado em ambiente e desenvolvimento) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2012.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CANDIDO, Verônica Scarpini; et al. Desenvolvimento de adoquim cerâmico com argilas caulínicas, chamote e argilito. **Revista Cerâmica**, v. 59, 2013.

CANDIDO, Verônica Scarpini. **Utilização de argilito e chamote de blocos de vedação na composição de massa de pavimento intertravado cerâmico – adoquim**. Dissertação de mestrado apresentada no centro de ciência e tecnologia da Universidade Federal no Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2012.

CASTELO BRANCO. V. T. F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. 2004. Tese. (Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CASTRO, M. A. M. *et al.* Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento conformados com coprodutos siderúrgicos. **Revista matéria**, v. 21 n 3, 2016.

COELHO, Antônio Carlos Vieira; SANTOS, Pêrsio de Souza. Argilas especiais: Argilas quimicamente modificadas – Uma revisão. **Química nova**, v. 30 n 5, 2007.

COELHO, Antônio Carlos Vieira; SANTOS, Pêrsio de Souza. Argilas especiais: O que são, caracterização e propriedades. **Química nova**, v 30 n 1, 2007.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro (2010)** – 1. Economia Mineral – Estatística – Brasil; 2. Mineração – estatística. V. 35 804p Brasília – Brasil.

FERREIRA, E. P. et al. Diagnóstico ambiental das áreas de extração de argila em município produtor de cerâmica vermelha. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8 n 14, 2012.

GHOLAMPOUR, Aliakbar; OZBAKKALOGLU, Togay. Performance of sustainable concretes containing very high-volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag. **ELSEVIER**, v. 156, 2017.

IABR. **Relatório de sustentabilidade**. Disponível em <<http://www.acobra-sil.org.br/site2015>> Acesso em 10 de maio de 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL, Mercado, dados do setor. Disponível em: www.institutoaacobrasil.net.br. Acesso em 2 de fevereiro de 2019

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. Tese (tese de doutorado) – EP USP, São Paulo, 1995.

LIMA, J. J. Estudo geoeconômico e tecnológico de argilas utilizadas na indústria cerâmica dos municípios de Irituia e São Miguel do Guamá, nordeste no Pará. 2000.

LIZZARAZO, J. M.; SALAS, A.; ESCOBAR, D. A. Efectos del curado em las propiedades de mezclas de concreto com altos contenidos de escoria de hierro. **Información Tecnológica**. v 2, 2016.

MACÊDO, A. N. Comportamento de blocos cerâmicos industriais produzidos a partir da mistura lama vermelha e argila. **Ambiente construído**, v. 11 n 4, 2011.

MELLO, A. H. et al., Diagnóstico de degradação ambiental em áreas de extração de argila em Marabá – PA. **Agroecossistemas** v. 9 n 1, 2017.

MORAIS, A. S. C. et al., Fluorescent Lamp Glass Waste Incorporation into Clay Ceramic: A perfect Solution. **JOM**, v. 68 n 9, 2016.

PINHEIRO, R. M.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. (2010). **Caracterização de matérias-primas para a fabricação de adoquim**. Anais: 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Foz do Iguaçu, Paraná. Disponível em: http://www.metallum.com.br/54cbc/trabalhos_técnicos.asp?Id=3.

RACANELI, L. de A. **Caracterização e determinação das propriedades tecnológicas de massas argilosas para a fabricação de blocos de vedação**. 2017. dissertação. (pós-graduação em engenharia de processos). Universidade Federal do Pará. Pará, 2017.

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

RAMOS, S. O. et al. Caracterização de argilas usadas para cerâmica estrutural. **REMAP**, v. 5.3, 2010.

RIPOLI, F. F. A. Utilização de rejeito industrial cerâmico – Chamote – como fator de qualidade na fabricação de elementos cerâmicos: um estudo experimental. **Cerâmica**, v 43, 1997.

RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos siderúrgicos: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**. São Paulo: Campo Belo, 2005.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia das argilas**, Volume 2 Ed V.1, Edgar Blucher LTDA, 1989.

SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO ECONOMICO, MINERAÇÃO E ENERGIA [<http://sedeme.com.br/portal/mineração/>]. Pará. Acesso em: 03 de junho de 2019. Disponível em: www.sedeme.com.br, 2012.

SOUZA, V. P. **Análises dos gases emitidos na produção de cerâmicas com adição de resíduos industriais**. 2007. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Norte-Fluminense, Rio de Janeiro, 2007.

TAGUCHI, S. P. et al., Avaliação das propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com o resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v 60 n 354, 2014.

TAKANO, Cyro et al., **A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.

TEIXEIRA-NETO, Érico.; TEIXEIRA-NETO, Ângela Albuquerque. Modificação química das argilas: Desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado. **Química nova**, v. 32 n 3, 2009.

VALICHESKI, R. R.; MARCIANO, C. R.; POCIANO, N. J. Avaliação econômica da reutilização de áreas degradadas pela extração de argila em Campos dos Goytacazes – RJ. **Revista Ceres**, 2009.

VIEIRA, C.M. F. *et al.*, Incorporação da lama de alto forno em cerâmica vermelha. **Revista Cerâmica**, Rio de Janeiro, v 53, 2007.

VLACK, L. H. V. Propriedades dos materiais cerâmicos. Ed. da universidade de São Paulo, 1973

WEIZENMANN, M. et al., Avaliação da incorporação de resíduo de gemas na massa de cerâmica vermelha: um estudo de caso. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v 59 n 351, 2013.