



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CAMPUS ANANINDEUA**

GEYNA EVELLYN SILVA DE JESUS

**ESTUDO DE INCORPORAÇÃO DE LAMA DE ALTO FORNO EM COMPOSIÇÃO
MÁSSICA PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS**

Ananindeua - PA

2019

GEYNA EVELLYN SILVA DE JESUS

**ESTUDO DE INCORPORAÇÃO DE LAMA DE ALTO FORNO EM COMPOSIÇÃO
MÁSSICA PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Faculdade de Engenharia de Materiais, da
Universidade Federal do Pará – CAMPUS:
Ananindeua -PA, como requisito parcial para
obtenção do grau de Bacharelado em
Engenharia de Materiais.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Verônica Scarpini
Candido.

Ananindeua, PA

2019

GEYNA EVELLYN SILVA DE JESUS

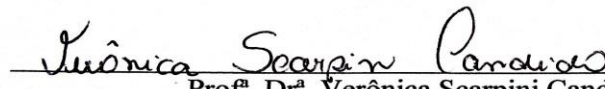
ESTUDO DE INCORPORAÇÃO DE LAMA DE ALTO FORNO EM COMPOSIÇÃO
MÁSSICA PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS.

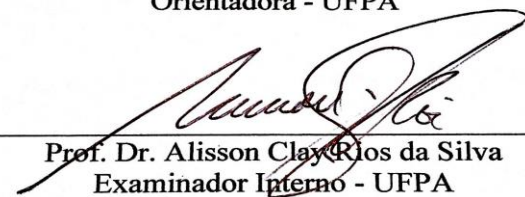
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará – CAMPUS: Ananindeua -PA, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia de Materiais. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Verônica Scarpini Candido.

Data da Aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA:


Prof^a. Dr^a. Verônica Scarpini Candido
Orientadora - UFPA


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


Prof^a. Me. Roberta Lima de Souza Costa
Examinadora Externa - SENAI

Ananindeua, PA

2019

Aos meus Pais, Geraldo e Elizabete por todo o apoio e incentivo para a realização desse sonho. E aos meus Avós, Boaventura e Zozimar, por todo o amor e carinho que tornaram essa graduação mais leve.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo seu infinito amor e misericórdia que me sustentaram até o final dessa graduação. Sem Ele não sou nada!

À minha orientadora, Prof.^a. Dr.^a. Verônica Scarpini pela orientação, paciência, incentivo e ensinamentos durante os meus quatro anos nessa graduação, deixo aqui minha gratidão e admiração.

Agradeço aos meus queridos e excelentíssimos Professores Alisson, Deibson, Edinaldo, Edemarino e Simone, por todos os ensinamentos ao longo dessa graduação, vocês são admiráveis!

À minha colega de trabalho e amiga Prof.^a. Me. Roberta Costa deixo aqui minha gratidão por toda a sua ajuda para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha amiga Lêda Racanelli pela ajuda nos gráficos, obrigada por disponibilizar o seu tempo.

Aos meus amigos maravilhosos, meus amores lindos, Fernanda Serrão, Jéssica Rocha, Marcelo Matsuura, Alana Duarte e Anderson Almeida que tornaram essa graduação mais leve, vocês foram anjos enviados por Deus!

Ao meu amigo Roberto Cruz, que sempre foi meu parceiro nessa jornada de estudos da graduação.

Às minhas primas Ilana Jesus e Daniela Jesus por acreditarem em mim sempre, pelas palavras de incentivo e força. Amo vocês!

À minha amiga Máira Bianca pelo apoio, amo você amiga, és um presente em minha vida.

Agradeço a todos os meus amigos e amigas que não citei aqui, mas que me ajudaram de alguma forma, sou imensamente grata a todos.

E por fim, aos meus amores mais lindos do mundo, agradeço a minha FAMÍLIA! Em especial, agradeço ao meu Tio Edejofre e a minha Tia Rose por todo apoio, conselhos e incentivos que culminaram para o término dessa graduação. Ao meu Pai José Flávio, por todo o seu amor e pelo apoio ao meu estudo. Aos meus Avós, Boaventura e Zozimar que amo muito. Ao meu Pai Geraldo e minha Mãe Elizabete, tudo que sou devo a vocês! Obrigada família por estarem em todos os momentos da minha vida, vocês fazem parte da realização desse sonho, AMO VOCÊS!

“Você não pode pular direto para o final, a jornada é a melhor parte”.
(How I Met Your Mother, 4x19).

RESUMO

O estudo tem como objetivo avaliar a influência da incorporação da lama de alto forno, proveniente de atividades siderúrgicas, como constituinte mássico em argilas para a fabricação de tijolos para construção civil. As argilas que foram utilizadas são oriundas de um município chamado de São Miguel do Guamá localizado no Estado do Pará. Foram classificadas em dois tipos: uma argila forte (AFO) e a outra argila fraca (AFR), onde, a AFO possui mais quantidades de argilominerais e menores quantidades de impurezas que a AFR. E a lama de alto forno, um resíduo proveniente de uma siderúrgica localizada no sudeste do Estado do Pará. O estudo iniciou com o beneficiamento das argilas e da lama e, tiveram-se como consequência as caracterizações. A caracterização química das argilas foi realizada por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e do resíduo por fluorescência de raio-X (FRX), a caracterização mineralogia foi feita por difração de raio-X (DRX). O comportamento térmico foi determinado através da análise termogravimétrica (TG) e (DTG). Além disso, realizou-se também a análise morfológica por microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foram preparadas massas com percentuais de 0, 5, 10 e 15% em peso de lama de alto forno e, a partir disso, foram moldados corpos de prova (CP), onde foram sinterizados nas temperaturas de 750, 850 e 950°C. Após a sinterização, foram determinadas as propriedades físicas e mecânica dos corpos de prova como massa aparente específica, absorção de água e tensão de ruptura a flexão em três pontos. Em seguida, foi feita a análise microestrutural das fraturas por MEV. Os resultados mostraram que a composição de 10% em peso do resíduo para a temperatura de 950°C foi o que apresentaram peças cerâmicas com melhores valores tecnológicos para potenciais de uso nas indústrias cerâmicas.

Palavras-chave: Lama de alto forno, argilas, tijolos, cerâmica

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the influence of blast furnace sludge incorporation from steelmaking activities as a mass constituent in clays for the manufacture of bricks for civil construction. The clays that were used come from a municipality called São Miguel do Guamá located in the State of Pará. They were classified into two types: one strong clay (AFO) and the other weak clay (AFR), where the AFO has more quantities. clay minerals and smaller amounts of impurities than AFR. And the blast furnace sludge, a waste from a steel mill located in the southeast of the state of Pará. The study began with the processing of clays and mud and had as a consequence the characterizations. The chemical characterization of the clays was performed by energy dispersive spectroscopy (EDS) and the residue by X-ray fluorescence (XRF), the mineralogy characterization was done by X-ray diffraction (XRD). The thermal behavior was determined by thermogravimetric analysis (TG) and (DTG). In addition, morphological analysis was also performed by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). Masses with percentages of 0, 5, 10 and 15 wt% Of blast furnace sludge were prepared and, from this, specimens (CP) were molded, where they were sintered at temperatures of 750, 850 and 950 ° C. After sintering, the physical and mechanical properties of the specimens were determined as specific apparent mass, water absorption and bending stress at three points. Then, the microstructural analysis of the SEM fractures was performed. The results showed that the composition of 10wt% by weight of the residue at a temperature of 950 ° C presented the ceramic pieces with better technological values for potential use in the ceramic industries.

Keywords: Blast furnace mud, clays, brinks, ceramics.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	10
1.1.1	Objetivo geral	10
1.1.2	Objetivos específicos	10
1.2	Justificativas	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Materiais Cerâmicos	11
2.1.1	Cerâmica Vermelha	11
2.1.2	Argilas	12
2.1.3	Constituição das Argilas	12
2.2	Produtos Cerâmicos	13
2.2.1	Tijolos	16
2.3	A Indústria Siderúrgica	17
2.3.1	Processo Siderúrgico	18
2.3.2	O Alto Forno e a produção de ferro gusa	19
2.4	Resíduos sólidos	21
2.4.1	Resíduos industriais	23
2.4.2	Lama de alto forno	23
2.4.3	Incorporação de Resíduo em Cerâmica	24
2.4.4	Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha	24
2.4.5	Considerações ambientais	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Materiais utilizados	27
3.2	Metodologias empregadas	28
3.2.1	Beneficiamento das matérias-primas e do resíduo	29
3.2.2	Caracterização das matérias-primas e do resíduo	29
3.2.3	Preparação das Composições	30
3.2.4	Preparação dos Corpos de Prova	31
3.2.5	Determinação das Propriedades Físicas e Mecânicas	32
3.2.6	Avaliação microestrutural	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	Composição Química	36
4.2	Caracterização mineralógica	36
4.3	Análise termogravimétrica	39

4.4 Microscopia Ótica	41
4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura	42
4.6 Massa Específica Aparente das Peças Cerâmicas Queimadas.	44
4.7 Retração Linear de Queima.....	44
4.8 Absorção de Água	45
4.9 Resistência à Flexão	46
4.10 Avaliação microestrutural	48
4.10.1 Microscopia Eletrônica de Varredura	48
5 CONCLUSÃO.....	53
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O setor de cerâmica vermelha no Brasil tem grande importância econômica e social, no entanto a grande maioria das jazidas de argilas não é devidamente estudada. A participação da indústria cerâmica brasileira é de cerca de 1% do PIB nacional, e aproximadamente 40% dessa participação vem do setor de cerâmica vermelha (BUSTAMANTE *et al.*, 2000). Esse setor consome cerca de 70 milhões de toneladas de matérias-primas por ano, com 12 mil empresas distribuídas pelo nosso país, geralmente são empresas de pequeno porte que geram centenas de milhares de empregos, o que reforça a importância social desse setor para o nosso país (BUSTAMANTE *et al.*, 2000).

Os resíduos, no Brasil, tem sido alvo de grande preocupação com relação ao seu destino final, pois grande parte é descartada no meio ambiente, assim, causando danos ao solo e a água, devido à sua complexidade de decomposição. Grande parte dos resíduos é do setor metalúrgico, e assim, a grande causa do problema está na forma de gerenciamento desses resíduos, pois não existe uma preocupação para que se tenha um descarte ambientalmente adequado para esses resíduos sólidos (MODESTO *et al.*, 2003).

Diversos resíduos são gerados, dentre eles está a lama de alto forno, que é o co-produto gerado após a etapa de lavagem dos gases do Alto-Forno e a separação dos particulados sólidos, na forma de lama, da água (VIEIRA *et al.*, 2007a). Esses pós, gerados no Alto-Forno, possuem elementos indesejáveis que prejudicam a reciclagem direta da lama de alto forno (VIEIRA *et al.*, 2007a).

No entanto, em estudos anteriores, mostra-se que a lama de alto forno, possui elementos que quando incorporados à massa cerâmica contribuem na melhora da estética das peças, dentre esses elementos se tem a hematita que enaltece a cor avermelhada da cerâmica (VIEIRA *et al.*, 2007b).

Assim, segundo os estudos de CANDIDO (2012), aponta-se que existe uma necessidade de aproveitamento de rejeitos de queima como um subproduto e a dar eles uma destinação final ambientalmente correta, como a produção das cerâmicas, a partir destes resíduos. Além disso, ao utilizar-se destes rejeitos sólidos para esta fabricação inovadora, pode-se agregar valor econômico e social para a comunidade envolvida.

Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo avaliar a influência da incorporação da lama de alto forno, um resíduo de atividades siderúrgicas, como constituinte mássico em argilas para a fabricação de tijolos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da incorporação da lama de alto forno, um resíduo de atividades siderúrgicas, como constituinte mássico em argilas para a fabricação de tijolos para construção civil.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização física, química e microestrutural das matérias-primas;
- Produzir corpos de prova prismáticos com incorporação de 0, 5, 10 e 15% em peso de lama de alto forno em massa argilosa;
- Avaliar a influência da temperatura de sinterização nos corpos de prova prismáticos em 750°C, 850°C e 950°C;
- Avaliar a influência da adição do resíduo nas propriedades físicas, químicas e mecânicas das peças cerâmicas queimadas.

1.2 Justificativas

Assim, pode-se inferir como justificativa os seguintes pontos:

- O estudo da cerâmica vermelha para a destinação final de resíduos sólidos pode ser uma solução tecnológica viável, talvez a mais adequada, pois evita o descarte desses resíduos no meio ambiente, além de favorecer melhoras nas propriedades das peças cerâmicas. Por conseguinte, o estudo da temperatura é essencial, pois ao se obter uma temperatura ideal de sinterização das peças cerâmicas se tem o controle da microestrutura e, consequentemente, das propriedades tecnológicas favoráveis a produção de cerâmica vermelha (SILVA, 2006).
- A incorporação de resíduos industriais pode contribuir para o aumento do faturamento financeiro das indústrias, principalmente pela economia de energia e de matéria-prima, com a possibilidade de uma melhora no processamento e na qualidade da cerâmica vermelha, agregando maiores valores ao produto final. (MOTHÉ, 2008).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são minerais compostos, químicos inorgânicos formados de forma natural. São corpos sólidos e cristalinos formados por processos químicos em ambientes geológicos. Eles são classificados e denominados com base em sua composição química e na estrutura dos materiais que o compõem. Dentre eles, as cerâmicas em sua maioria, que são compostos formados entre elementos metálicos e não-metálicos, possuem óxidos, nitretos e carbetos. (CALLISTER, 2008).

Entretanto, destacam-se as cerâmicas tradicionais, que são aquelas, cuja composição é formada por minerais argilosos, como exemplo tem-se: o cimento e o vidro. Apesar de existirem ainda alguns dos materiais cerâmicos compostos pelo óxido de alumínio (ou Alumina, Al_2O_3), o dióxido de silício (ou sílica, SiO_2), o carbeto de silício (SiC), o nitreto de silício (Si_3N_4).

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica - ABCERAM (2019), a definição para materiais cerâmicos é a de materiais constituídos por produtos químicos inorgânicos, exceto os metais e suas ligas, que são obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas.

Comparáveis a rigidez e resistência dos metais, os materiais cerâmicos possuem comportamentos semelhantes. As cerâmicas são tipicamente muito duras, no entanto são altamente suscetíveis a fratura por serem extremamente frágeis (ausência de ductilidade) (CALLISTER, 2008).

Com relação ao comportamento mecânico, os materiais cerâmicos são mais resistentes a altas temperaturas e ambientes severos do que os metais e os polímeros, também são tipicamente isolantes a passagem de calor e eletricidade. Com relação as suas características ópticas, as cerâmicas podem ser transparentes, translúcidas, opacas, e alguns dos óxidos cerâmicos exibem comportamento magnético. (CALLISTER, 2008).

2.1.1 Cerâmica Vermelha

A cerâmica vermelha se caracteriza pela sua coloração avermelhada e pelos seus produtos, que são tijolos, lajotas, telhas, tubos cerâmicos, blocos e argilas expandidas (MOTTA *et al.*, 2001). A indústria de cerâmica vermelha possui aspectos bastante positivos

no que diz respeito à matéria-prima abundante, sua durabilidade, e possibilidade de reutilização ou reciclagem ao final da vida útil. Diversos estudos desenvolvidos em centros de pesquisa de todo o país consideram ainda a possibilidade de reaproveitamento de resíduos de outras indústrias como matéria-prima na confecção dos produtos de cerâmica vermelha (MODESTO *et al.*, 2003).

2.1.2 Argilas

As argilas são definidas como um material muito fino com granulometria de até 2 μ m que quando em contato com a água adquirem plasticidade, quando seca apresenta característica rígida e dura tornando difícil de ser desagregada com as mãos, e quando queimada a temperaturas elevadas apresenta dureza igual à dos metais (ANDRADE *et al.*, 2011).

Segundo a ABNT/NBR 6502 (1995), em sua definição a argila é constituída principalmente por argilominerais, e em pequenas quantidades por substâncias orgânicas e inorgânicas. Por conseguinte, um solo de faixa granulométrica fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002mm, que apresenta coesão e plasticidade. Podem ser definidas quimicamente como silicatos de alumínio hidratados, na sua forma mais pura.

2.1.3 Constituição das Argilas

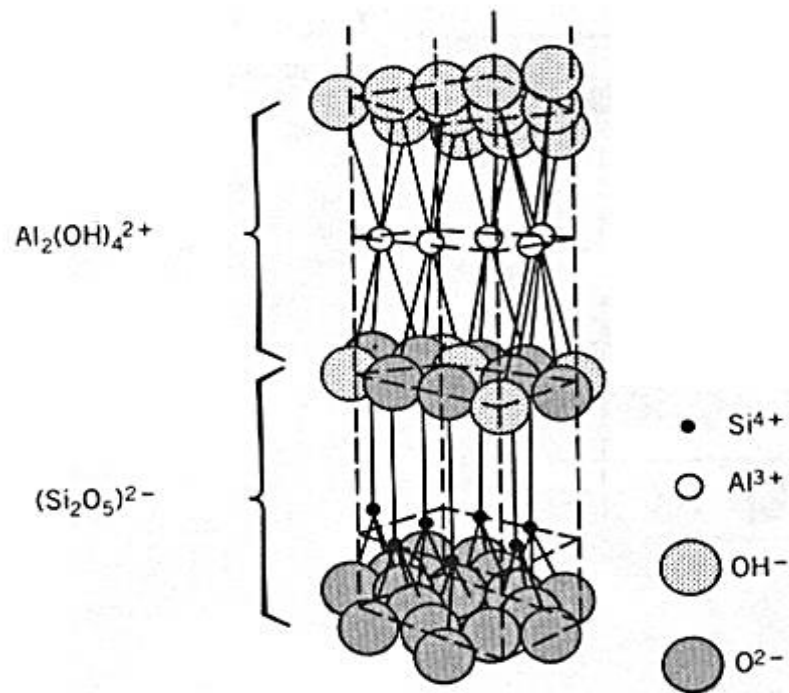
Durante muito tempo se conceituou argila como derivada da Caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), porém, hoje, sabe-se que podem ter outras origens. A argila é constituída por partículas cristalinas extremamente pequenas chamadas de argilominerais, das quais a Caulinita é a mais abundante e importante (SANTOS, 1989). A argila é encontrada abundantemente na natureza, nas margens dos rios e manguezais. É barata e fácil de manipular. É reciclável e se conserva ao longo dos anos somente exigindo um pouco de cuidado e umidade.

As argilas são tipicamente constituídas por uma matriz de aluminossilicatos, composta por alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), ligadas a molécula de água. Em que a composição química e estrutural das argilas, e suas características físicas e mecânicas são amplamente complexas, suas impurezas são predominantemente constituídas por compostos de óxidos

como: cálcio, bário, potássio, sódio e ferro, além de pequenas quantidades de matéria orgânica (MORENO, 2012).

Segundo Callister (2012), as argilas que possuem interesse mais comum são as que apresentam estrutura da caulinita. A Figura 1 mostra a estrutura cristalina da argila caulinita $[Al_2O_2(Si_2O_5)(OH)_4]$, conforme a figura 1.

Figura 1 - Estrutura do argilomineral caulinita.



Fonte: Callister, 2012.

Assim, quando se adiciona água, as moléculas de água posicionam-se entre essas lâminas em camadas e formam uma película fina ao redor das partículas de argila. As partículas ficam livres para se moverem sobre as outras, e assim garantindo a plasticidade resultante da mistura água-argila.

2.2 Produtos Cerâmicos

Desde o Período da Pedra Polida, o homem fabricava utensílios de barro; foram descobertos cestos de vime recobertos de argila; posteriormente, o homem descobriu que o calor fazia o barro endurecer, tornando-o resistente à água e, assim, criando outros artefatos (NORTON, 1987). Essa evolução da utilização da argila atravessou séculos e possibilitou que a cerâmica hoje venha a ocupar um importante papel como material de construção de diversos

objetos em todo o mundo, desde os produtos rústicos a elementos decorativos, como tijolos, telhas e vasos, produzidos de forma artesanal ou industrial, até produtos altamente sofisticados, como os supercondutores.

Segundo SANCHEZ *et al.*, (2014), o setor cerâmico é bastante amplo e heterogêneo, onde se pode dividi-los em sub-setores ou seguimentos em função de suas matérias-primas, áreas de utilização e propriedades dos materiais.

Com isso, segundo a ABCERAM (2019), segue a seguinte classificação dos produtos cerâmicos com as suas respectivas exemplificações:

- Cerâmica Vermelha:

São os materiais que apresentam coloração avermelhadas utilizados na construção civil como tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos, e argilas expandidas. As lajotas muitas vezes são enquadradas nas cerâmicas vermelhas, no entanto se enquadram melhor nos materiais de revestimento.

- Materiais de Revestimento (Placas Cerâmicas):

Materiais que possuem forma de placa usados na construção civil para revestimentos de paredes, pisos, bancadas e piscinas de ambientes externos e internos. Como exemplo, os azulejos, as partilhas, porcelanato, grés, lajota, piso, etc.

- Cerâmica Branca:

As argilas que vitrificam entre 1200° e 1500°C são utilizadas na fabricação de louças e são quase exclusivamente constituídas de caulim. Tem coloração branca antes e depois do cozimento. São materiais recobertos por um corpo branco e em geral envolvidos por uma camada vítrea transparente e incolor, e assim agrupados pela cor branca da massa, necessárias por razões estéticas ou técnicas. São materiais bem diversificados e com o advento dos vidrados opacificados, vários produtos passaram a ser fabricados sem certa rigorosidade de fabricação, tendo certo grau de impurezas nas suas matérias-primas, responsáveis pela coloração.

Assim, é mais adequado subdividir esse grupo em: louça sanitária, louça de mesa, isoladores elétricos para alta e baixa tensão, cerâmica artística (decorativa e utilitária), cerâmica técnica para fins diversos, tais como: químico, elétrico, térmico e mecânico.

- Materiais Refratários

Compreende-se a um grupo de materiais que só fundem e vitrificam a mais de 1500°C. São chamados de Materiais Refratários e existem de vários tipos e cores, com uma grande diversidade de produtos, possuem uma capacidade de suportar elevadas temperaturas nas condições específicas do processo e operações dos equipamentos industriais. Em sua constituição, em sua maioria, envolve ataques químicos, variações bruscas de temperaturas e outras variações. Por conta desses processos e pela natureza dos materiais refratários, foram desenvolvidos vários tipos de produtos, de diferentes matérias-primas ou misturas destas.

Os Materiais Refratários estão dentre os materiais cerâmicos avançados, e mais antigos por resistirem a altíssimas temperaturas, bem como a efeitos mecânicos, químicos e físicos. São geralmente confeccionados na forma de tijolos de alta densidade, baixa porosidade para evitar a entrada de ar, e são usados como revestimento de fornos metalúrgicos, de caldeiras e fornos usados para fabricação de vidros.

Assim, os materiais refratários podem ser classificados em: sílica, sílico-aluminoso, aluminoso, mulita, magnésiano cromítico, cromítico-magnésiano, carbetos de silício, grafita, carbono, zircônia, zirconita, espinélio e outros.

- Isolantes Térmicos:

Podem ser classificados em:

- a) refratários isolantes que se encaixam no segmento de refratário;
- b) isolantes térmicos não refratários, compreendem produtos como a vermiculita expandida, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro e lã de rocha, que são gerados por processos distintos ao do item a) e assim, podem ser utilizados até 1100°C, dependendo do tipo do produto;
- c) fibras ou lãs cerâmicas que apresentam características físicas parecidas as citadas no item b), no entanto apresentam composições tais como sílica, sílica-alumina e zircônia, que podem chegar a 2000°C ou mais, dependendo do tipo.

-Fritas e Corantes:

Estes dois produtos são importantes matérias-primas para diversos seguimentos cerâmicos que precisam de certos acabamentos. As fritas ou vidrado fritado é um vidro moído, esse é fabricado a partir da fusão de diferentes matérias-primas. Aplica-se na superfície do corpo cerâmico, dando aspecto vítreo na superfície após a queima. Este acabamento tem por finalidade melhorar a estética do material, aumentar a resistência mecânica, tornar a peça impermeável, melhorar e aprimorar outras características.

Os corantes caracterizam-se por se constituírem de óxidos puros ou pigmentos inorgânicos sintéticos, esses são obtidos a partir da mistura de óxido e seus compostos. Estes pigmentos são fabricados por empresas especializadas, onde a obtenção envolve a mistura das matérias-primas, calcinação e moagem.

Os corantes são adicionados aos esmaltes (vidrados) ou aos corpos cerâmicos para lhe dar colorações e tonalidades especiais.

-Abrasivos, Vidro, Cimento e Cal:

Os abrasivos são parte da indústria de abrasivos conhecidos por utilizarem processos e matérias-primas semelhantes aos da cerâmica, definem-se num segmento cerâmico. Os produtos abrasivos mais conhecidos são o óxido de alumínio eletrofundido e o carbetto de silício.

O vidro, cimento e cal são três importantes segmentos cerâmicos, no entanto, possuem suas particularidades, e assim considerados por várias vezes à parte da cerâmica.

- Cerâmica de Alta Tecnologia/Cerâmica Avançada:

São produtos que conferem o aprofundamento do conhecimento da ciência dos materiais, onde o desenvolvimento de novas tecnologias e aprimoramento das existentes nas mais diferentes áreas, como aeroespacial, eletrônica, nuclear e muitas outras, levou-se ao desenvolvimento dessas cerâmicas de alta tecnologia.

Estes materiais passaram a ser desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por processos super controlados. Possuem diferentes formatos e são chamados de cerâmica de alta tecnologia ou cerâmica avançada. São classificados de acordo com as suas funções, em: eletroeletrônicos, magnéticos, ópticos, químicos, térmicos, mecânicos, biológicos e nucleares.

As cerâmicas avançadas são de uso interno e seu uso tende a se ampliar a cada dia. Alguns exemplos em que esses produtos se inserem, podem-se destacar as naves espaciais, satélites, usinas nucleares, materiais para implantes em seres humanos, aparelhos de som e de vídeo, suporte de catalisadores para automóveis, sensores (umidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos, acendedor de fogão, etc.

2.2.1 Tijolos

É classificado como um material de Cerâmica Vermelha. Segundo a ABNT NBR 15270-1 (2017), classifica as unidades cerâmicas como blocos ou tijolos de vedação ou estrutural, esta norma define os requisitos dimensionais, físicos e mecânicos exigíveis no recebimento de blocos cerâmicos de vedação a serem utilizados em obras de alvenaria de vedação, com ou sem revestimento. E dessa forma, conforme a NBR 15270-1 (2017), os requisitos específicos no que se refere a conformação dos blocos cerâmicos, devem ser feitos por conformação plástica de matéria-prima argilosa, contendo ou não aditivos, e sinterizados a elevadas temperaturas. Para blocos estruturais a resistência mecânica mínima permitida é de 1,5 MPa. A absorção de água deve estar entre 8 e 25% para todas as classes de blocos estruturais.

Essas categorias para os tijolos comuns estão diretamente relacionadas às suas resistências a compressão, o que define tal classificação. Os tijolos especiais são fabricados em formatos e especificações exigidas pelas partes, não devem apresentar defeitos sistemáticos tais como trincas, quebras, superfícies irregulares, deformações e desuniformidade na cor.

Ainda, de acordo com a NBR 15270-1 (2017), os tijolos comuns devem possuir a forma de um paralelepípedo-retângulo, sendo suas dimensões nominais recomendadas conforme os valores da Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões para um tijolo comum em milímetro.

Comprimento	Largura	Altura
190	90	57
190	90	90

Fonte: ABNT NBR 15270-1/2017.

2.3 A Indústria Siderúrgica

O setor siderúrgico é de grande importância quanto ao fornecimento de insumos para diversos outros setores da indústria de transformação, bem como para a construção civil (MOURÃO, 2004). Trata-se de uma indústria caracterizada pela presença de grandes empresas, em geral verticalizadas, que operam as diversas fases do processo produtivo, desde a transformação do minério em ferro primário (ferro gusa), até a produção de bobinas

laminadas a quente, a frio ou galvanizadas, para aplicação em produtos na indústria automotiva, de bens de capital, naval, entre outras (MOURÃO, 2004).

A sua importância também está na indústria de transformação, na participação do Produto Interno Bruto - PIB do país e na geração de empregos. Segundo o Instituto Aço Brasil - IABr (2016), a produção de aço bruto da indústria siderúrgica brasileira atingiu 30,2 milhões de toneladas em 2016, enquanto a produção de produtos siderúrgicos chegou a 37,5 milhões de toneladas no mesmo ano.

Contudo, a indústria siderúrgica é intensiva em capital e possui como principais insumos o minério de ferro, que possui grande disponibilidade no território nacional, fabricando produtos de boa qualidade para o mercado nacional e internacional. Entretanto, o carvão mineral, que além de ser escasso, possui baixa qualidade, o que faz com que boa parte desse insumo seja importado para o setor siderúrgico brasileiro (MOURÃO, 2004).

2.3.1 Processo Siderúrgico

Para as ações do Processo Siderúrgico na indústria são empregadas três matérias-primas básicas: minério de ferro, carvão mineral e calcário. As usinas de aço do mundo inteiro, segundo o modelo de processo produtivo, classificam-se em: 1. *Integradas*, que operam as três fases básicas: redução, refino e laminação; 2. *Semi-integradas*, que operam duas fases: refino e laminação; 3. *Não integradas*, denominadas de unidades produtoras que operam apenas uma fase do processo: redução ou laminação (MOTHÉ, 2008).

Segundo o IAB (2019), a fabricação do aço consiste em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação.

- Preparação da carga: onde grande parte do minério de ferro (finos) é aglomerada, utilizando-se cal e finos de coque. O produto obtido é chamado de sinter. Em seguida, o carvão é processado na coqueria, transformando-se em coque.

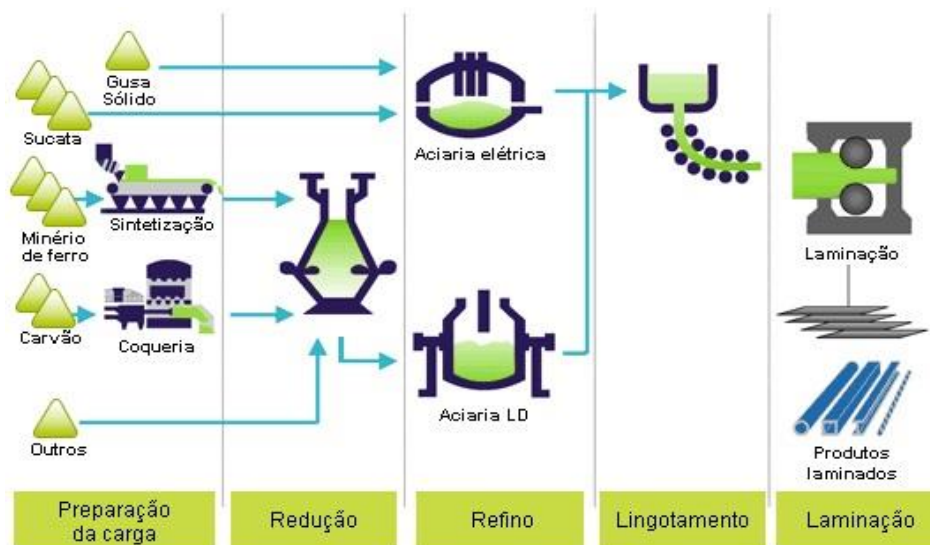
- Redução: essas matérias-primas já preparadas são carregadas no alto forno. O oxigênio aquecido a uma temperatura de 1000°C é soprado pela parte inferior do alto forno, onde o carvão, em contato com o oxigênio, produz calor que dá início ao processo de redução do minério de ferro em ferro gusa. O gusa é uma liga de ferro e carbono com um teor de carbono muito alto.

- Refino: as aciarias que têm seu funcionamento a oxigênio ou elétricas, são utilizadas para transformar o gusa líquido ou sólido, e a sucata de ferro e aço, em aço líquido. O carbono contido no gusa é retirado juntamente com as impurezas. O aço líquido tem sua maior parte solidificada em equipamentos de lingotamento contínuo para produção de semi-acabados (lingotes e blocos).

-Laminação: os chamados semi-acabados (lingotes e blocos), nessa etapa são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos, onde sua nomenclatura dependerá de sua forma e/ou composição química.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS (BRASIL, 2018), com a evolução da tecnologia, as fases de redução, refino e laminação estão sendo reduzidas no tempo, assegurando maior velocidade na produção no que concerne às usinas integradas. Desta forma, na Figura 2, apresentam-se os setores deste tipo de usina.

Figura 2 - Esquema de uma Usina Integrada



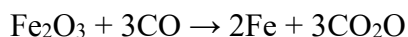
Fonte: IBF (2019).

2.3.2 O Alto Forno e a produção de ferro gusa.

O Alto Forno é um aparelho metalúrgico, destinado para a fusão redutora do minério de ferro, que possui funcionamento contínuo e de recinto único. Quando em funcionamento, ele se caracteriza por ficar em contato com as cargas e os gases, com isso produz grandes

reações entre eles. O Alto Forno derrete o minério de ferro e o purifica, transformando-o em um líquido 95% ferroso chamado de ferro gusa.

A reação química que ocorre na transformação do minério de ferro em ferro gusa é dada por:



Assim, o ferro gusa é o produto de primeira fusão obtido a partir da fusão do minério em alto forno. “É a forma intermediária pela qual passa todo o ferro em maior parte para a produção do aço.” (MOURÃO, 2004, p.251).

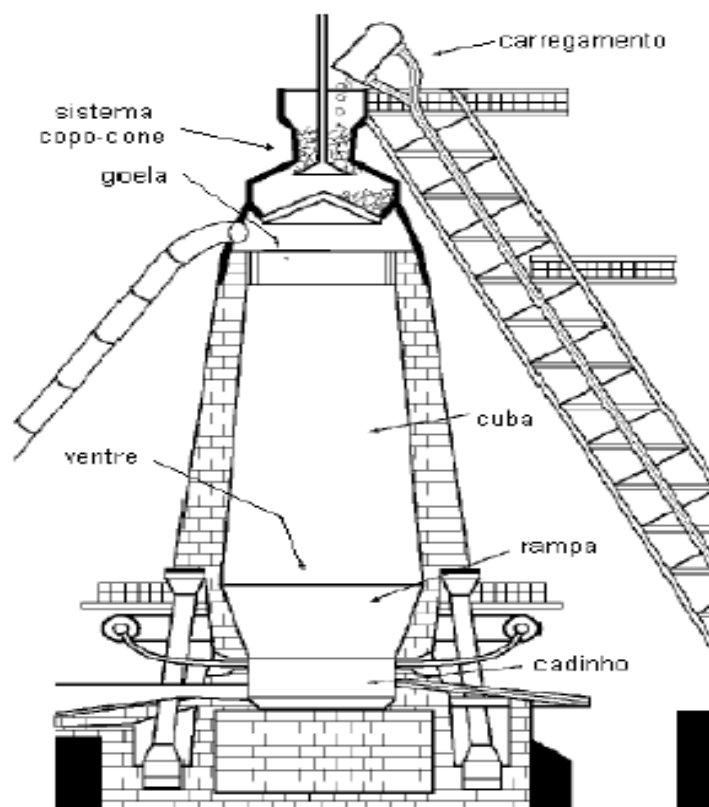
Ainda, segundo (MOURÃO, 2004), o alto forno é constituído pelas partes a seguir, onde na Figura 3 está representado cada parte descrita.

- a) **Goela:** é a parte que está localizada acima da cuba. É revestida internamente de placas de desgastes que protegem o refratário do impacto da carga durante o enformamento.
- b) **Cuba:** tem a forma de uma grande seção troncocônica, com a base maior apoiada sobre o ventre (ou o cadinho).
- c) **Ventre:** região cilíndrica sobre a rampa. Em alguns altos-fornos não há ventre, a rampa se une diretamente a cuba.
- d) **Rampa:** está colocada sobre o cadinho e tem a forma troncocônica. É a zona de fusão dos materiais.
- e) **Cadinho:** é a parte mais baixa do alto-forno. Sua função é coletar o gusa e, por cima deste, a escória à medida que se forma (MOURÃO, 2004, p.255).

O alto forno é um trocador de calor à contracorrente construído por uma carcaça metálica de aço revestida de tijolos refratários, e que o cadinho é a parte mais baixa, onde é depositado o gusa, e, por cima deste, a escória à medida que se forma (MENEZES *et al.*, 2002).

O Brasil se destaca como produtor de ferro gusa a partir do carvão vegetal, sendo o maior produtor mundial. Os Estados brasileiros que se destacam nesta produção são: Maranhão e Pará, onde se concentram a maioria dos produtores; sendo a maior produtora representante nacional de Ferro Gusa no Brasil a Viena Siderúrgica do Maranhão S.A. que contém cinco altos-fornos em funcionamento. Na Figura 3, tem-se a representação de um alto forno com as suas respectivas partes.

Figura 3 - Partes de um Alto Forno



Fonte: MOURÃO (2004).

2.4 Resíduos sólidos

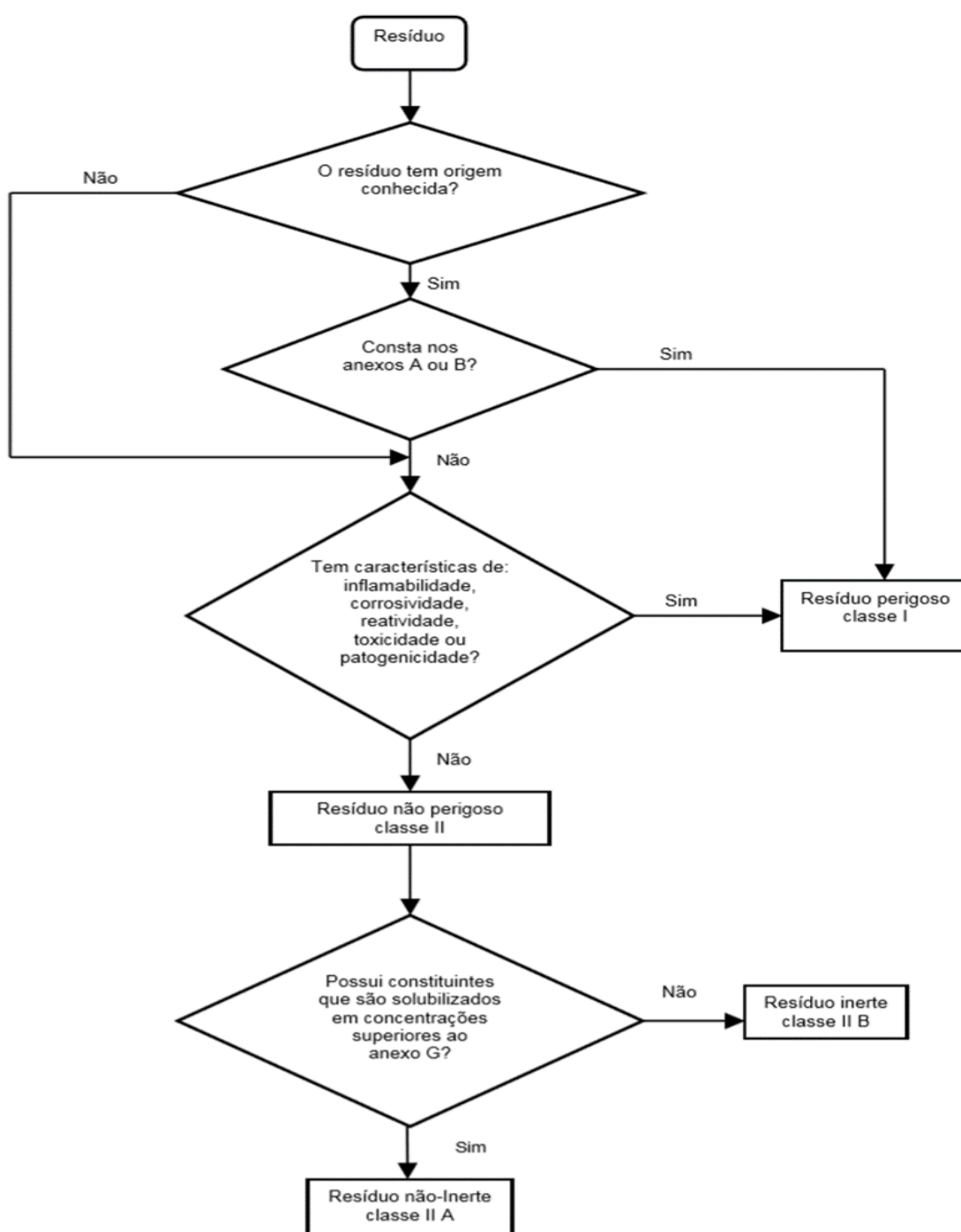
Para Candido (2012), a geração de resíduos industriais e urbanos é um dos maiores problemas que a sociedade moderna enfrenta. Assim, os restos sólidos ou semi-sólidos das atividades humanas ou não humanas são definidos por resíduos; que para a atividade fim onde foram gerados não apresentam mais utilidade, no entanto podem virar insumos para outras atividades como bem afirma (MENEZES *et al.*, 2002).

Com a escassez das matérias-primas não renováveis e o volume de resíduos sólidos gerados nos processos produtivos, a alternativa mais adequada é o aproveitamento dos rejeitos industriais, pois os resíduos são produzidos e, quando não são bem destinados, podem levar a destruição de paisagem, fauna e flora. Uma das formas de minimizar os impactos é a preservação dos recursos naturais ou a reutilização de resíduos. (MENEZES *et al.*, 2002).

De acordo com a norma ABNT NBR 10004 (2004), os resíduos no estado sólido ou semi-sólido se definem como materiais resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta

definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. Assim, na Figura 4, apresenta-se a metodologia empregada pela (ABNT NBR 10004, 2004) que classifica os resíduos sólidos.

Figura 4 - Caracterização e classificação de resíduos



Fonte: (ABNT NBR 10004, 2014).

Observa-se na Figura 4, a classificação dos resíduos sólidos pela ABNT NBR 1004 (BRASIL, 2014), os resíduos sólidos podem ser divididos ainda em duas classes I e II.

Os resíduos de classe I são aqueles que em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar risco à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

No entanto, os resíduos da classe II são aqueles que não apresentam as características dos resíduos citados acima, ou seja, são aqueles não-perigosos. A classe II é subdividida em duas subclasses A e B, em que a primeira caracteriza os resíduos não inertes, são aqueles que a concentração de algumas substâncias esteja fora das especificações exigidas, e a segunda, caracteriza-se pelos resíduos inertes, ou seja, as concentrações se situam dentro dos limites pré-estabelecidos pela norma. A norma apresenta uma listagem de resíduos perigosos previamente caracterizados (MOTHÉ, 2008).

2.4.1 Resíduos industriais

Segundo (VIEIRA *et al.*, 2007a), o setor siderúrgico gera uma diversidade de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas nas suas diversas etapas de processamento. Com relação aos resíduos siderúrgicos, destaca-se as escórias, pós, lamas e carepas. Dependendo do tipo do resíduo, pode ser retornado ao processo, como fonte de energia ou como matéria-prima para a produção de aço, ou ainda comercializado como co-produto para outras atividades industriais.

Para a indústria, os resíduos siderúrgicos podem gerar custos adicionais e sem a correta destinação desses resíduos, sérios problemas ambientais podem ocorrer, causando degradação do solo, contaminação dos lençóis freáticos e outras fontes de água, além da contaminação do ar. No entanto, a incorporação desses resíduos em composição mássica para produzir peças cerâmicas é uma alternativa tecnológica utilizada, o que pode contribuir para a redução dos impactos ambientais gerados por esses (LIMA *et al.*, 2013).

2.4.2 Lama de alto forno

A lama de alto forno é um resíduo siderúrgico gerado após a etapa de lavagem do gás de alto forno. Esse resíduo é constituído predominantemente por óxidos de ferro e de finos de coque (VIEIRA *et al.*, 2007a). A reciclagem direta dos pós de alto forno é prejudicada pela presença de elementos indesejáveis tais como o zinco, chumbo e metais alcalinos. Estes elementos com baixos pontos de fusão podem causar problemas operacionais interferindo nas reações que ocorrem no alto forno (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

2.4.3 Incorporação de Resíduo em Cerâmica

Os processos industriais geram resíduos com diversas características. Contudo, devido à composição variada das massas argilosas e sua alta plasticidade, tornou-se possível a incorporação de diversos resíduos, reduzindo, assim, os rejeitos provenientes de diversas atividades industriais (CANDIDO, 2012).

Segundo CANDIDO (2012), devido os diversos tipos de resíduos de diferentes atividades, foram propostas as seguintes classificações quanto à incorporação às massas cerâmicas: Resíduos redutores de plasticidade e plastificantes; Resíduos fundentes; resíduos combustíveis; e Cinzas volantes. Onde cada tipo de resíduo confere ao material cerâmico economia a seu custo final de produção ou melhora as propriedades tecnológicas dessa peça.

2.4.4 Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha.

A lama de alto forno, por exemplo, é um resíduo gerado após a etapa de lavagem do gás de Alto-Forno. A reciclagem direta dos pós do alto forno é prejudicada pela presença de elementos indesejáveis tais como o zinco, chumbo e metais alcalinos (VIEIRA *et al.*, 2007a).

Segundo os estudos realizados por (VIEIRA *et al.*, 2007a) (VIEIRA *et al.*, 2007b), a lama de alto forno possui granulometria apropriada para incorporação em cerâmica vermelha. A composição química do resíduo é semelhante ao da argila, o que facilita sua incorporação. A incorporação do resíduo contribui para a economia energética durante a etapa de queima da cerâmica, por conta da combustão dos finos de coque presentes na lama. Sugere-se que o resíduo seja incorporado em percentuais abaixo de 5% em peso para minimizar os efeitos deletérios nas propriedades físicas e mecânicas da cerâmica.

A incorporação incrementa a quantidade de hematita na cerâmica, contribuindo para enaltecer a coloração avermelhada atribuindo um valor estético para as peças cerâmicas. Os

elementos tóxicos presentes no resíduo são inertizados na incorporação, pois os ensaios de solubilização e lixiviação se mostraram ideal na análise ambiental (VIEIRA *et al.*, 2007b), indicando ser viável tecnicamente a reciclagem de lama de alto forno em cerâmica argilosa.

Ainda, segundo COSTA (2018), a incorporação da lama de alto forno em cerâmica vermelha, atualmente, apresenta-se como uma das principais soluções tecnológicas para a disposição final de resíduos sólidos industriais, pois a variabilidade natural das características das argilas associada às técnicas de processamento relativamente simples e ainda a baixa performance exigida para os referidos produtos, permitem a presença de níveis de impurezas relativamente elevados. Com isso, pode-se deliberadamente incorporar outros tipos de materiais resultantes das mais diversas fontes de geração, a partir da incorporação de lama alto forno, proveniente de usinas do tipo integrada, nas propriedades e microestrutura de uma massa argilosa utilizada na fabricação de cerâmica vermelha, por exemplo.

2.4.5 Considerações ambientais

A questão ambiental vem sendo amplamente discutida em todo o mundo globalizado, em eventos nacionais e internacionais, nos últimos anos, tendo mobilizado desde a opinião pública até de reis, governantes e estadistas. O que vem corroborar para o ser humano assumir o papel preponderante e responsável em suas comunidades. A sustentabilidade do planeta trata-se de uma responsabilidade coletiva e de múltiplas e diversificadas ações para melhorar o ambiente global que vivemos.

Portanto, faz-se necessário repensar sobre as fontes de matérias-primas, sobre os ciclos de vida dos materiais de forma sustentável, onde são necessárias, a inclusão de práticas de produção e consumo sustentáveis. A consciência de que as atividades econômicas no planeta causam enormes danos e problemas ambientais, decorrentes da geração de resíduos que requer políticas públicas no sentido de se aproveitar o potencial de uso para diminuir o consumo de matérias-primas não renováveis (MOTHÉ, 2008).

A geração de resíduos se torna preocupante nos seguintes aspectos: Primeiramente, social, onde algumas industriais lançam estes resíduos nos recursos hídricos ou despejam, ilegalmente, nos aterros e em locais inapropriados; Em segundo, relacionada ao setor industrial, pelo comprometimento de espaços úteis, pois esses resíduos são depositados, na maioria dos casos, nos pátios das indústrias ou a céu aberto, poluindo o meio ambiente e agredindo a natureza. (CANDIDO, 2012). Assim, o estudo sobre a incorporação dos resíduos em matriz cerâmica vermelha, têm sido alvo de grandes estudos e interesses científicos,

devido as suas inúmeras vantagens e contribuições para diminuições dos impactos ambientais gerados pelos resíduos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

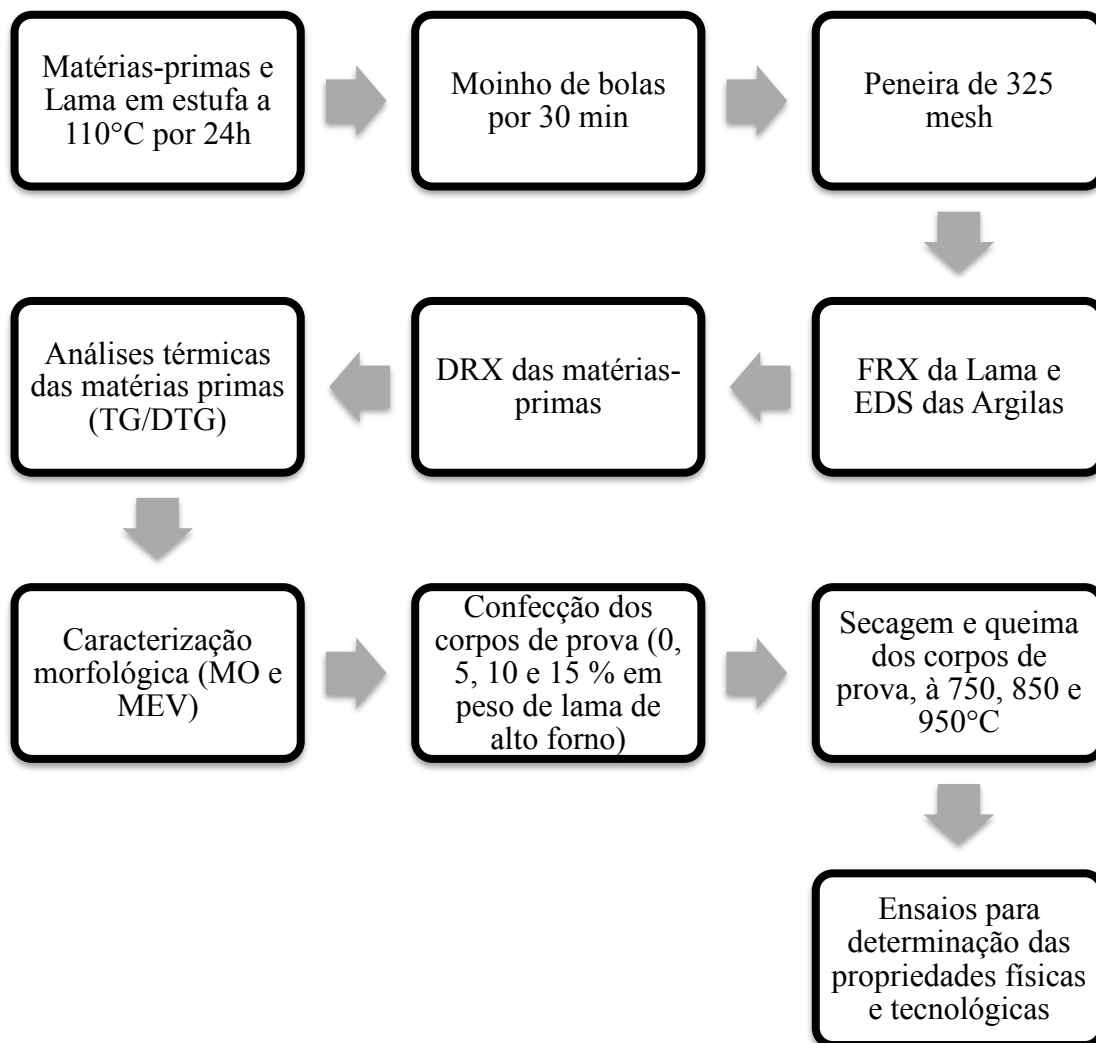
3.1 Materiais utilizados

Neste trabalho, utilizaram-se como matérias-primas, dois tipos de argilas, uma argila forte e uma argila fraca, de uma indústria cerâmica do município de São Miguel do Guamá, localizado no Estado do Pará.

A argila forte possui maiores quantidades de argilominerais e menores quantidades de impurezas que a argila fraca, a argila forte também são conhecidas por argilas plásticas que são responsáveis por conferirem certas características à peça cerâmica durante a etapa de conformação, como por exemplo, trabalhabilidade da massa (SANTOS, 1989). A lama de alto forno, que foi o resíduo utilizado no presente estudo, foi obtida de uma indústria siderúrgica do sudeste do Estado do Pará.

Após a coleta, os materiais foram encaminhados ao Laboratório de Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará. A Figura 5 apresenta de forma sucinta os procedimentos experimentais realizados neste estudo.

Figura 5- Fluxograma dos procedimentos experimentais.



Fonte: A. Autora, 2019.

As nomenclaturas utilizadas para identificação das matérias-primas: argila forte (AFO), para a argila fraca (AFR) e para a lama de alto forno (LAM). Para as formulações de 0, 5, 10 e 15% em peso de adição da lama de alto forno, utilizaram-se as nomenclaturas, AFOAFR, AFOAFR5LAM, AFOAFR10LAM e AFOAFR15LAM, respectivamente.

3.2 Metodologias empregadas

O procedimento experimental envolveu:

- Beneficiamento das matérias-primas e do resíduo;
- Caracterização das matérias-primas e do resíduo;

- Conformação dos corpos de prova por prensagem uniaxial em matriz metálica;
- Sinterização dos corpos de prova;
- Determinação das propriedades físicas e mecânicas das peças cerâmicas;
- Análise microestrutural.

3.2.1 Beneficiamento das matérias-primas e do resíduo

As argilas e o resíduo foram colocadas em estufa a 110°C por 24 horas, e posteriormente foram desagregadas em moinho de bolas por 30 minutos. Após a desagregação, as matérias-primas e o resíduo foram passadas em peneira de 325 mesh, para serem submetidas a processos de caracterizações.

3.2.2 Caracterização das matérias-primas e do resíduo

A caracterização das argilas e do resíduo consistiu na determinação da composição química, caracterização mineralógica e caracterização física. A caracterização química foi realizada por fluorescência de raios-X (FRX) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS). A caracterização mineralógica foi realizada por meio de testes de difração de raios-X (DRX). As análises térmicas por termogravimetria e termogravimetria derivada (TG/DTG). A caracterização morfológica das matérias-primas e do resíduo foi efetuada por microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.2.2.1 Composição química

A identificação dos componentes químicos presentes no resíduo foi feita através de uma análise quantitativa em espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) em equipamento Axios Minerals da PANalytical do laboratório de Geociências da UFPA.

As argilas foram caracterizadas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) no Laboratório de Pesquisa e Análise de Combustível – LaPAC da UFPA. Foi utilizado o equipamento Espectrometria de raios-x – 720X marca Shimadzu Corporation.

3.2.2.2 Difração de raios-X (DRX)

A análise dos minerais presentes nas argilas e no resíduo foi realizada por difração de

raios-X. A análise das fases cristalinas foi feita em Difratorômetro de Raios-X, marca Empyrean, da PANalytical operando com radiação Cobre (Cu-K α) e varredura de 2θ variando de 5 a 60° do LCM-IG/UFPA.

3.2.2.3 Análises térmicas (TG/DTG)

A análise termogravimétrica foi feita em aparelho termo analisador STA 449F3, com taxa de aquecimento de 10°C. min⁻¹. A análise térmica diferencial foi realizada em BP engenharia, modelo BP 300.

3.2.2.4 Microscopia ótica (MO)

A morfologia das partículas das argilas e do resíduo foi avaliada por microscopia ótica no Laboratório de Microscopia ótica e de varredura do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA) por microscopia ótica (MO) modelo: Eclipse LV 150/150A da Nikon e posteriormente fotografadas.

3.2.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia das partículas das matérias-primas e do resíduo foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Laboratório de Microscopia ótica e de varredura do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA), utilizando um microscópio eletrônico de varredura de bancada Hitachi PANalytical TableTop SEM TM3030.

3.2.3 Preparação das Composições

Para a preparação das composições, as argilas e o resíduo foram levados para serem secos na estufa de modelo DIMATE à 105°C $\pm$ 5°C a 110°C por 24 horas.

As formulações foram preparadas, a primeira sem adição de resíduo (AFOAFR), e as outras com adições de 5, 10 e 15% em peso de adição de lama de alto forno. Foram adicionados 8% em peso de água para umedecer as formulações, por conseguinte as formulações foram encaminhadas a um moinho de bolas da marca WORK INDEX, Série 005, por 30 minutos, para garantir a homogeneidade da massa, em seguida, passadas em peneira de

abertura de malha igual a 35 mesh. Dessa forma, têm-se na Tabela 2 as formulações do estudo.

Tabela 2 – Formulações das matérias primas, Argila Forte (AFO), Argila Fraca (AFR), e Lama de Alto Forno (LAM).

Formulações	Matérias primas %			Quantidades de corpos de provas
	AFO	AFR	LAM	
AFOAFR	50	50	-	30
AFOAFR5LAM	47,5	47,5	5	30
AFOAFR10LAM	45	45	10	30
AFOAFR15LAM	42,5	42,5	15	30

Fonte: A Autora, 2019.

3.2.4 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram confeccionados por prensagem uniaxial em matriz retangular de dimensões com aproximadamente 10,0 x 5,0 x 1,0 cm de acordo com os padrões exigidos pela NBR 5738.

Utilizou-se uma prensa hidráulica manual Karl Kolb *ScientificTechnicalSupplies*D-6072 de fabricação alemã com uma prensagem uniaxial de 100KNmostrada na Figura 6.

Figura 6 – Prensa hidráulica manual Karl Kolb



Fonte: Acervo da autora, 2019.

Após a confecção dos corpos de prova, foram deixados à temperatura ambiente por 24 horas, e em seguida encaminhados para serem secos em estufa a aproximadamente 110°C.

Por conseguinte, os corpos de prova foram encaminhados a um forno tipo mufla, da marca Linn Elektro Therm, para serem sinterizados à diferentes temperaturas, 750, 850 e 950°C. Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 2°C/min e mantidos a uma temperatura de patamar por 2 horas. O resfriamento foi por convecção natural, desligando-se o forno.

3.2.5 Determinação das Propriedades Físicas e Mecânicas

Após a sinterização, foram-se determinadas as propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova como massa aparente específica, absorção de água e tensão de ruptura a flexão.

3.2.5.1 Ensaios físicos e mecânicos

3.2.5.1.1 Massa aparente específica

A massa aparente específica foi determinada por método dimensional, com auxílio de um paquímetro digital Mitutoyo (resolução $\pm 0,01\text{mm}$) foram determinadas as medidas de altura, comprimento e largura dos corpos de prova. As massas foram determinadas através da balança digital de marca EVEN, modelo BL-320AB-BI (precisão 0,1g).

A massa específica aparente foi calculada através da equação (1).

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa específica aparente(em g/cm^3);

M = massa (em g);

V = volume dos corpos de prova queimados (em cm^3).

3.2.5.1.2 Retração linear de queima

Para a retração linear, determinaram-se as dimensões das peças secas sinterizadas que foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital Mitutoyo (resolução $\pm 0,01\text{mm}$). Assim, calculou-se a retração das peças queimadas através da equação (2):

$$RLq(\%) = \frac{L_s - L_q}{L_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

RLq = Retração Linear de queima;

L_s = Comprimento do corpo de prova seco;

L_q = Comprimento do corpo de prova após queima.

3.2.5.1.3 Absorção de água

Os corpos de prova foram pesados e posteriormente colocados em um recipiente com água fervente por duas horas e resfriados submersos em água. Em seguida, foi retirada a água superficial e os corpos de prova foram novamente pesados para que se pudesse obter o valor de absorção de água.

Assim, a absorção de água foi calculada pela equação (3):

$$AA (\%) = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

M_u = peso do corpo de prova úmido (em g);

M_s = peso do corpo de prova seco (em g).

3.2.5.1.4 Determinação da resistência a flexão

O ensaio da resistência a flexão foi determinado de acordo com a norma ASTM D-C674 – 13, em máquina universal de ensaios de acionamento mecânico, marca Arotec wdw-100E, com velocidade igual a 2 mm/min.

O módulo de resistência à flexão (MRF) determina o valor da carga que, aplicada ao corpo de prova, causa uma ruptura após o aumento uniforme desta. Sendo assim, a resistência a flexão é calculada pela seguinte expressão (4):

$$MRF_{(MPa)} = \frac{3P_R L}{2I_R h_R^2} \quad (4)$$

Onde:

MRF = módulo de ruptura de flexão (em MPa);

P_R = Carga atingida no momento de ruptura (em N);

L = Distância entre os apoios (em mm);

I_R = Largura do corpo de prova (em mm);

h_R = Altura do corpo de prova (em mm).

3.2.6 Avaliação microestrutural

3.2.6.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A avaliação microestrutural das cerâmicas queimadas foi realizada por MEV após a seleção das amostras, conforme o item 3.2.2.5. No Laboratório do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Composição Química

Na Tabela 3, mostra-se a composição química das argilas que foram determinadas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e do resíduo que se determinou por fluorescência de raio-X (FRX).

As argilas possuem baixas quantidades de óxidos fundentes que são responsáveis pela formação de fase líquida durante a queima dos corpos de prova, possuem alta quantidade de sílica e alumina. O resíduo possui altas quantidades de óxido de ferro, esses valores poderão enaltecer a cor avermelhada da peça cerâmica, melhorando a estética da peça.

Tabela 3 - Composição química das argilas e da lama de alto forno.
PF: Perda ao fogo.

Componentes	Argila Forte (% em peso)	Argila Fraca (% em peso)	Lama de alto forno (% em peso)
SiO₂	46,42	62,8	2,70
Al₂O₃	27,90	21,5	1,95
Fe₂O₃	4,23	4,56	36,3
TiO₂	1,30	1,07	0,21
MnO	0,11	-	0,38
MgO	0,72	0,23	0,30
CaO	0,21	0,02	4,99
K₂O	3,67	0,07	0,30
SO₃	-	-	0,80
ZnO	-	-	0,49
Cl	-	-	0,65
PF	11,96	9,89	50,8

Fonte: A Autora, 2019.

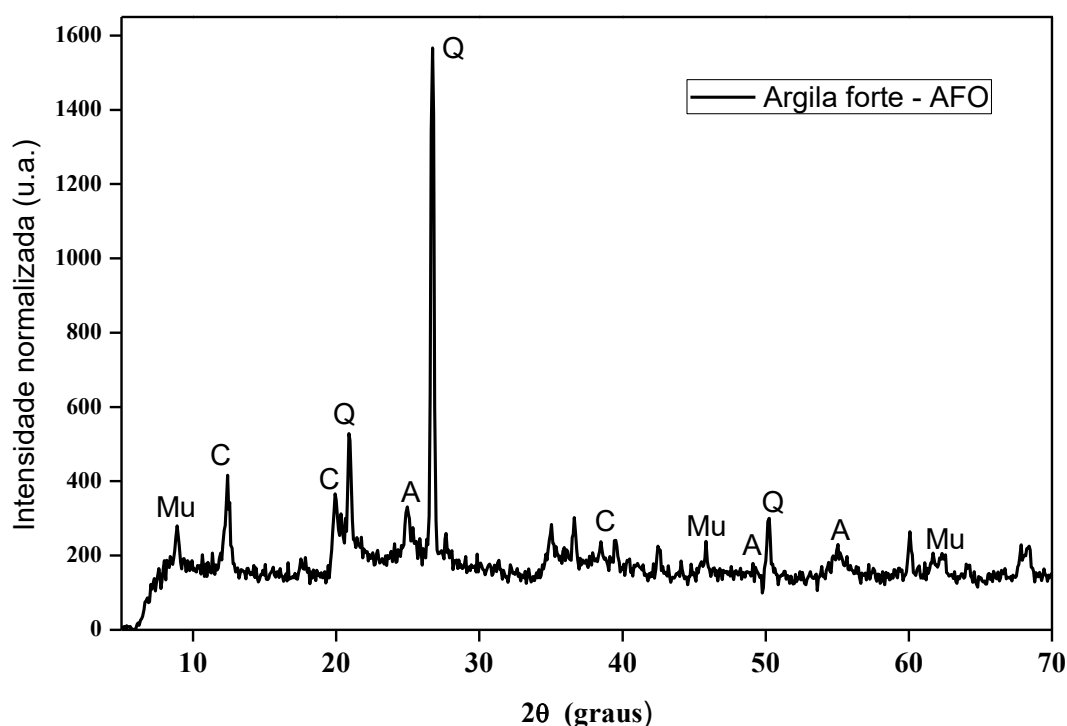
4.2 Caracterização mineralógica

A Figura 7 e a Figura 8 apresentam o difratograma de raios-X da argila forte e da argila fraca, respectivamente. Notam-se como fases presentes nas argilas a caulinita, argilomineral predominante nas argilas, quartzo, mica muscovita e anatásio. Ressalta-se que as argilas tipicamente cauliníticas, são caracterizadas por apresentarem um comportamento de

queima refratário (VIEIRA, 2004).

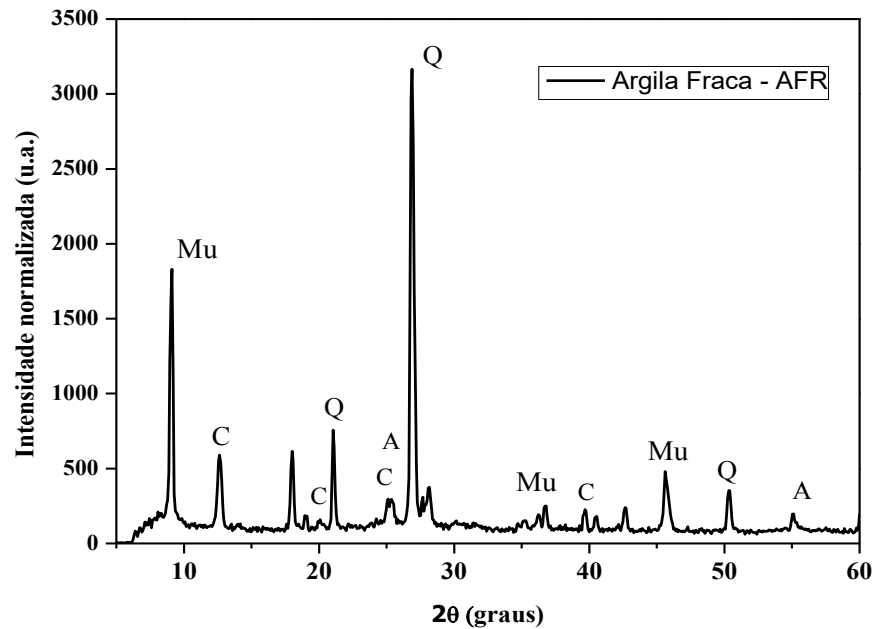
O pico com maior evidência é o do quartzo, devido o seu alto grau de intensidade, obtido no difratograma. O quartzo é a principal impureza nas argilas e apresenta comportamento não plástico e inerte durante a queima. A caulinita, por sua vez, é o argilomineral responsável em dá plasticidade as argilas, quando essas estiverem em contato com a água. Segundo VIEIRA *et al.* (2009), a caulinita é responsável pela característica refratária das peças cerâmicas, quando queimadas em temperaturas bem elevadas. A mica muscovita, possui organização lamelar e pode causar defeitos na peça cerâmica, no entanto, devido a suas partículas com tamanhos reduzidos, ela pode atuar como fundente, devido aos seus óxidos alcalinos (VIEIRA *et al.*, 2009)

Figura 7 - Difratograma de raios-x da AFO. C = caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A= anatásio.



Fonte: A Autora, 2019.

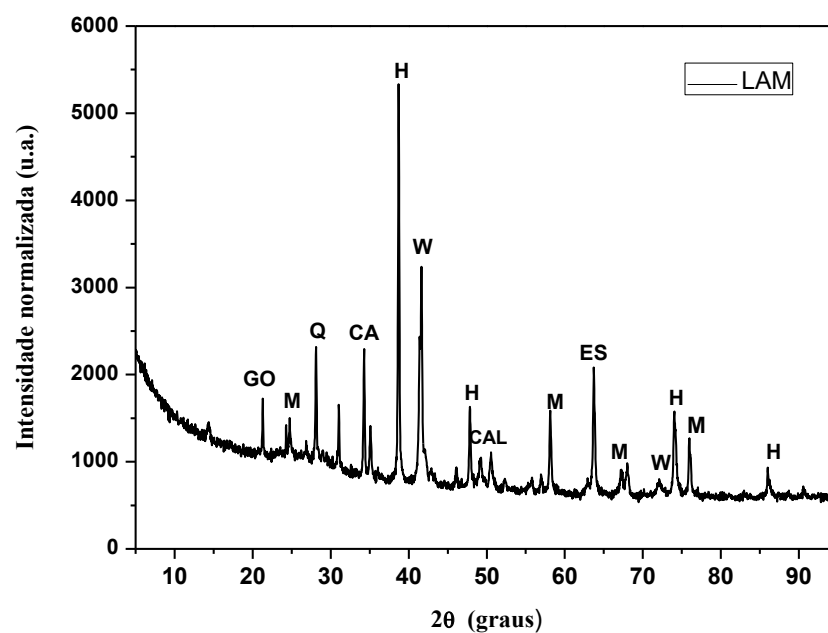
Figura 8 - Difratoograma de raios-x da AFR. C = caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A = anatásio.



Fonte: A Autora, 2019.

A Figura 9 mostra o difratograma da lama de alto forno.

Figura 9 – Difratoograma de Raio-X da LAM. Ca: calcita, Es: espinélios, Go: goetita, H: hematita M: magnetita, Q: quartzo, W: wustita, CAL: calcário.



Fonte: A Autora, 2019.

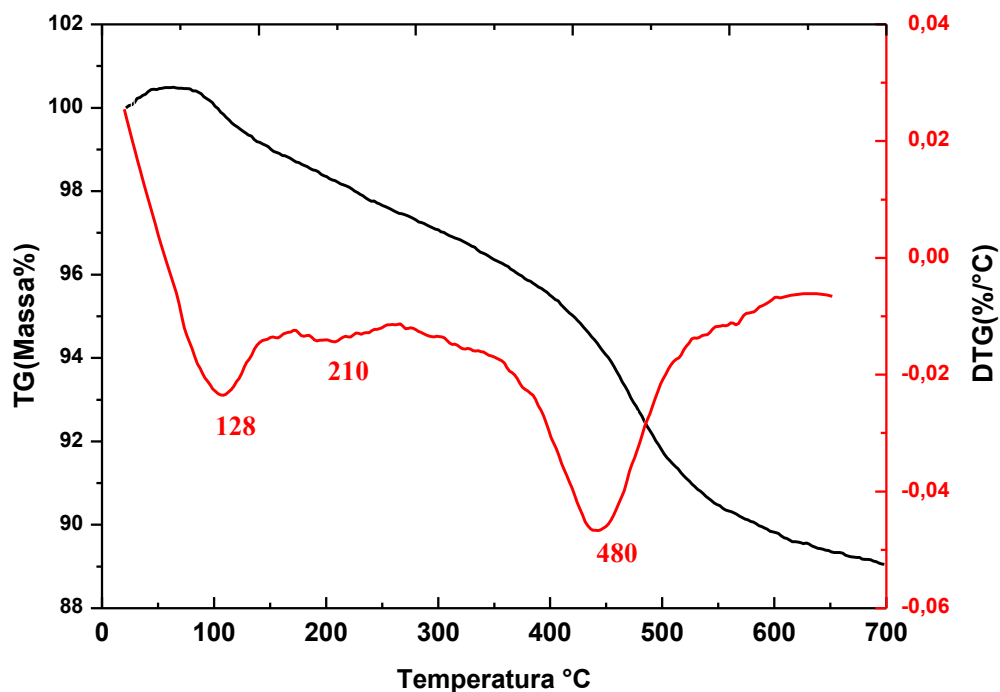
O difratograma da lama de alto forno apresenta as fases como a hematita, a wustita e a magnetita, já que o resíduo é constituído predominantemente de óxidos de ferro, no entanto também são observadas fases como a calcita e o quartzo.

A calcita presente é relacionada ao óxido de cálcio e o quartzo relacionado ao elemento sílico, que foram identificados na composição química do resíduo. Todas as fases presentes no difratograma, confirmam a fluorescência de raio-x feita da lama de alto forno.

4.3 Análise termogravimétrica

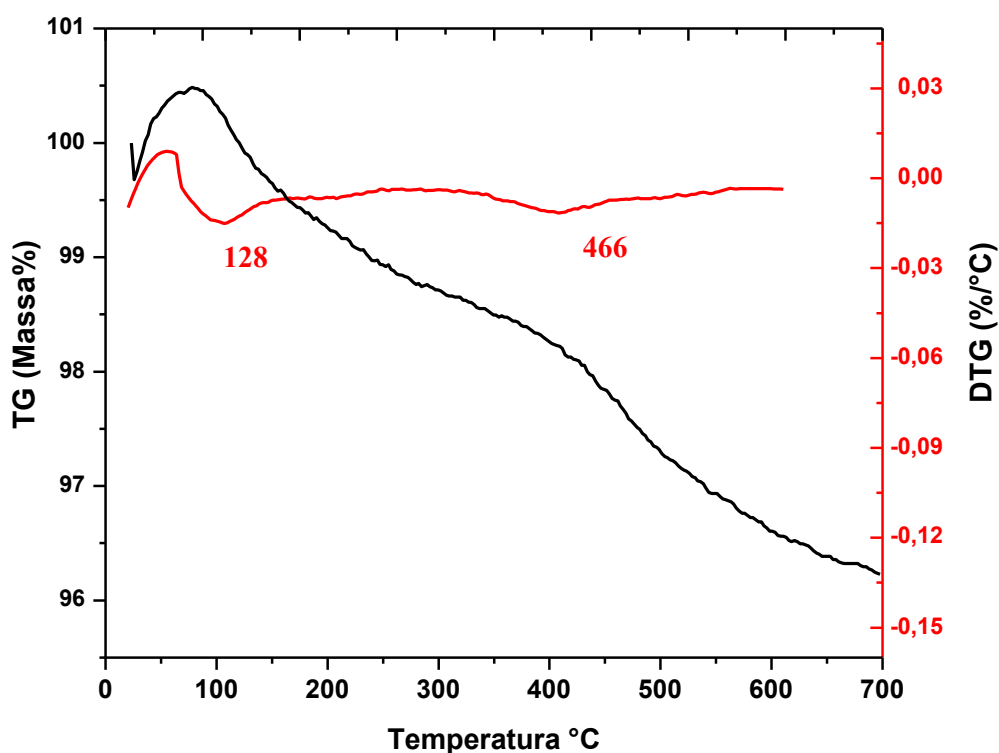
Na Figura 10 e Figura 11, apresentam-se as curvas de TG e DTG da argila forte e da argila fraca, respectivamente.

Figura 10 – Curvas de TG/DTG da argila forte.



Fonte: A Autora, 2019.

Figura 11 – Curvas de TG/DTG da argila fraca

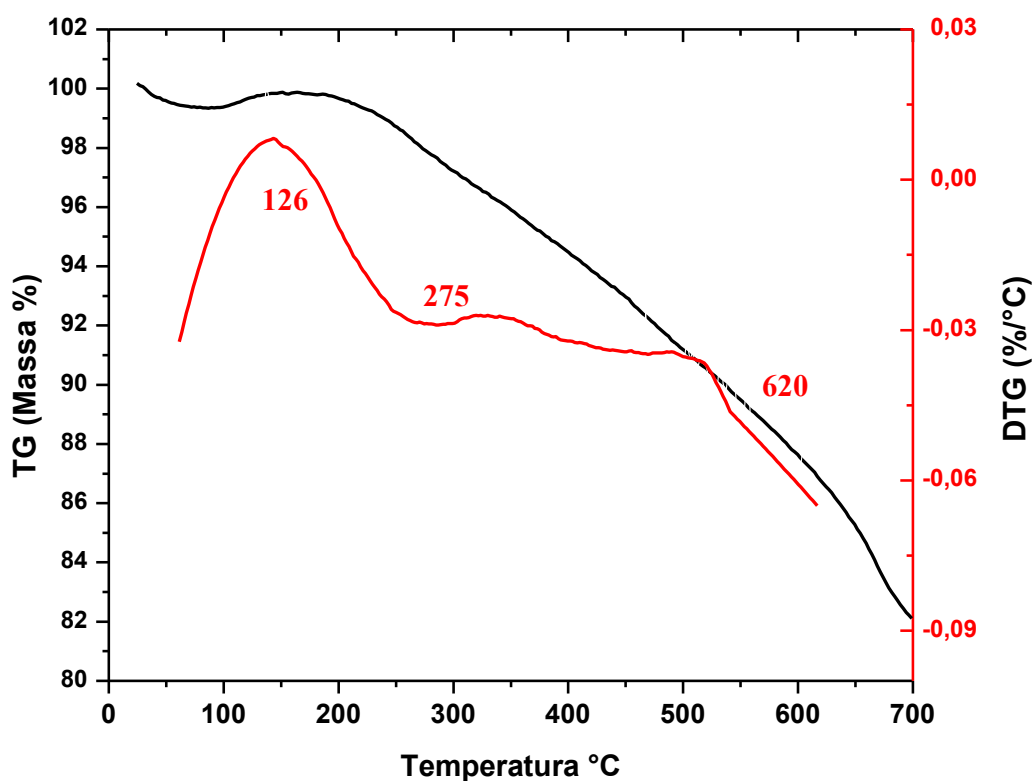


Fonte: A Autora, 2019.

Analisando curvas de TG e DTG das argilas, observam-se para ambas as argilas, uma perda de massa a aproximadamente 128°C que pode estar relacionado à perda de água de umidade do material. Por conseguinte, a aproximadamente 210°C há outra perda de massa que pode estar relacionada à perda de água intersticial das argilas e de matéria orgânica. Outra perda de massa é possível ser observada a aproximadamente 480°C nas curvas de TG e DTG da argila forte e a aproximadamente 466°C na argila fraca, onde essa perda de massa, para ambas, pode estar relacionada à decomposição da caulinita em metacaulinita (SANTOS, 1989).

Na Figura 12, mostram-se as curvas de TG e DTG da lama de alto forno.

Figura 12 – Curvas de TG/DTG da lama de alto forno



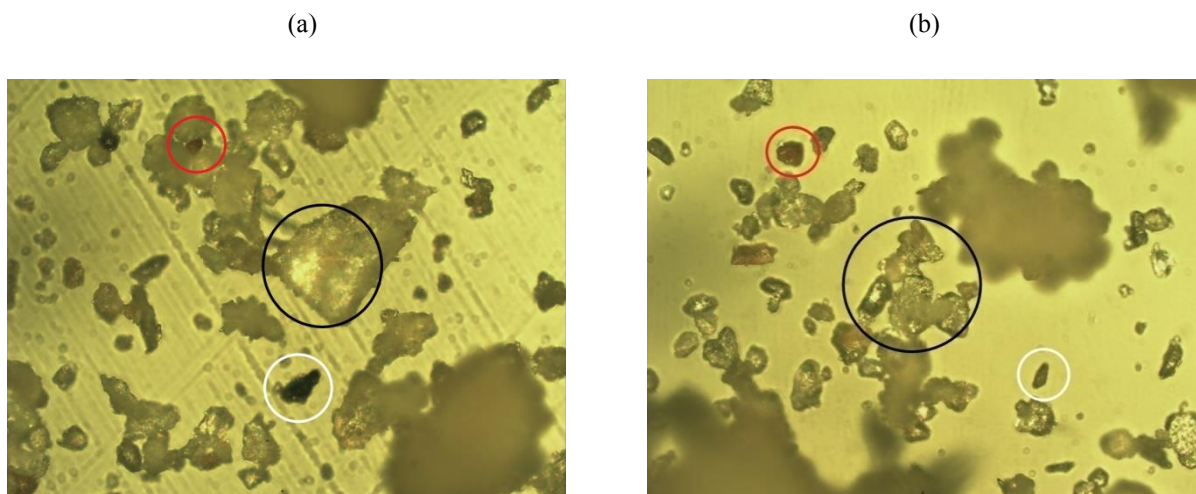
Fonte: A Autora, 2019.

Para as curvas de TG e DTG da lama de alto forno, há uma perda de massa inicial a aproximadamente 126°C, referente a uma possível perda de água de umidade, a aproximadamente 275°C há outra perda de massa, que pode estar associada a uma perda de água higroscópica do material, esta perda também pode estar associada à desidratação da goetita identificada no DRX da lama de alto forno. Outra perda de massa é observada a aproximadamente 620°C, que pode estar relacionada à combustão dos finos de coque que não foram identificados no DRX, pois apresentam caráter amorfo, assim esse resultado comprova que o resíduo pode contribuir para uma economia energética durante a queima das peças cerâmicas (MOTHÉ, 2008).

4.4 Microscopia Ótica

Nas Figuras 13, observam-se as microscopias óticas das argilas.

Figura 13 - Micrografia obtida por MO das argilas: argila forte (a); argila fraca (b).

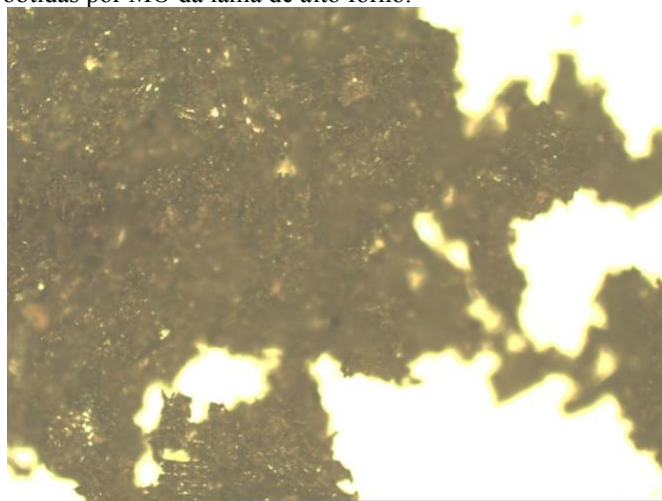


Fonte: A Autora, 2019.

Notam-se nas micrografias, a presença do mineral micáceo, que está circulado em branco. Já em círculo preto, observa-se a presença de quartzo, e, por conseguinte, circulado em vermelho, minerais ferromagnesianos. O que confirma os resultados de DRX das argilas.

A seguir, na Figura 14, tem-se a microscopia ótica da lama de alto forno.

Figura 14 - Micrografias obtidas por MO da lama de alto forno.



Fonte: A Autora, 2019.

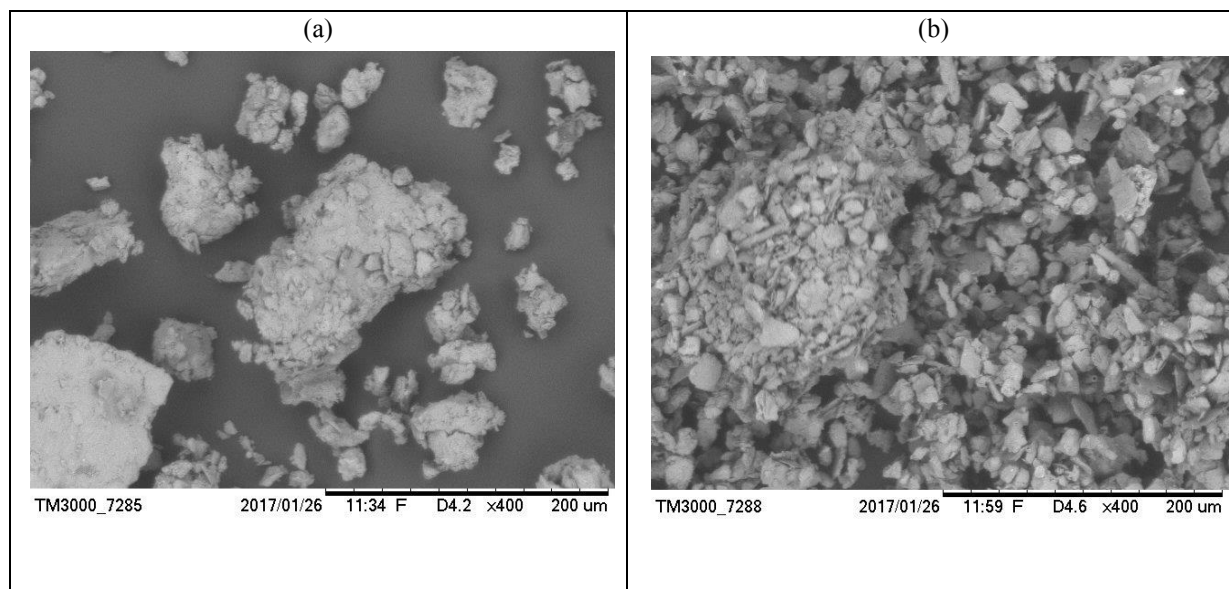
Para a micrografia do resíduo, pode-se observar a presença de uma coloração escura, o que confirma os resultados de DRX, pois se tem a presença de óxidos de ferro no resíduo, nota-se também que há partículas aglomeradas.

4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na Figura 15, são apresentadas as características morfológicas das argilas, realizadas por meio da microscopia eletrônica de varredura. Nota-se que a argila forte (a) apresenta partículas mais aglomeradas que a argila fraca (b). Nas duas se podem observar como

característica morfológica a distribuição de partículas com coloração branca que podem estar associadas ao quartzo mostrado nos resultados de EDS das argilas.

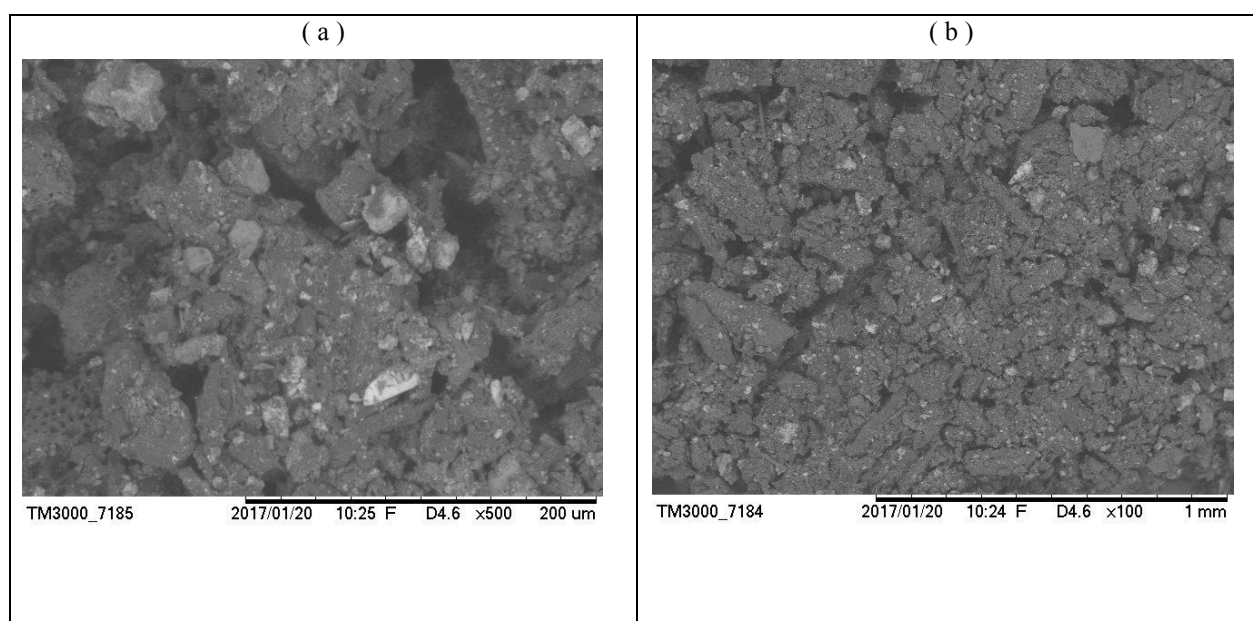
Figura 15 - Micrografia obtida por MEV da argila forte (a) e da argila fraca (b), aumento de x400.



Fonte: A Autora, 2019.

Na Figura 16, mostram-se as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da lama de alto forno. Pode-se observar que as partículas não possuem um padrão morfológico, ou seja, não apresentam simetria. Suas partículas mais escuras podem estar associadas ao óxido de ferro, e as partículas mais claras podem estar associadas ao quartzo, confirmando os resultados de FRX do resíduo.

Figura 16- Micrografia obtida por MEV da lama de alto forno, (a) aumento de x100 e (b) aumento x500.



Fonte: A Autora, 2019.

4.6 Massa Específica Aparente das Peças Cerâmicas Queimadas.

A Tabela 5 mostra os valores para a massa específica aparente dos corpos de provas sinterizados em diferentes temperaturas e formulações diferentes. Para os valores de massa específica aparente dos corpos de prova queimados a 750, 850 e 950°C, a faixa de variação foi igual a 1,45 a 1,83 g/cm³ para 750°C, 1,44 a 1,82 g/cm³ para 850°C e 1,42 a 1,90 g/cm³ para 950°C.

Nota-se que para todas as temperaturas houve uma diminuição da massa específica quando o resíduo foi incorporado. Segundo SANTOS (1989), a densidade máxima permitida para a cerâmica vermelha é abaixo de 2,7 g/cm³, assim, todos os resultados de massa específica obtidos estão abaixo dos valores apresentados por SANTOS (1989). A composição (AFOAFR5LAM) com adição de 5% em peso do resíduo para a temperatura de 950°C foi o que apresentou maior valor para massa específica aparente.

O aumento da massa específica aparente significa que os corpos de prova apresentam um maior empacotamento das partículas ocorrido durante a etapa de conformação, onde em altas temperaturas os processos de sinterização são mais avançados, ocasionando formação de fase líquida e, conseqüentemente uma diminuição da porosidade das peças cerâmicas (CANDIDO, 2012).

Tabela 5 – Massa Específica Aparente das peças queimadas em g/cm³. Argila Forte (AFO); Argila Fraca (AFR); Lama de alto forno (LAM).

Composições	Massa Específica Aparente (g/cm ³)		
	CPs Queimados		
	750°C	850°C	950°C
AFOAFR	1,83±0,12	1,82±0,09	1,87±0,02
AFOAFR5LAM	1,53±0,09	1,65±0,11	1,90±0,01
AFOAFR10LAM	1,69±0,09	1,50±0,13	1,64±0,03
AFOAFR15LAM	1,45±0,037	1,44±0,076	1,42 ± 0,035

Fonte: A Autora, 2019.

4.7 Retração Linear de Queima

Na Figura 17, tem-se o gráfico da retração linear de queima das peças cerâmicas sinterizadas em diferentes temperaturas.

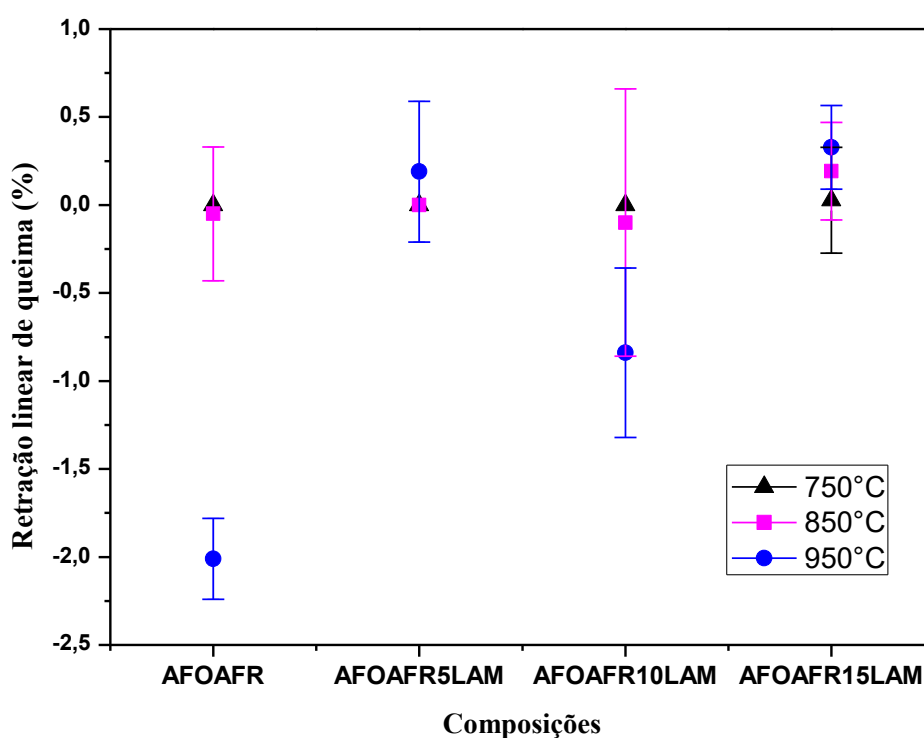
Segundo a ABNT NBR 15310 (2009), o limite máximo exigido para os valores de retração linear de queimar é de 2%, dessa forma todas as composições ficaram dentro dos

padrões exigidos pela NBR.

Para o gráfico de retração linear de queima dos corpos de provas sinterizados, pode-se observar que para a temperatura de 750°C não houve retração linear. Por conseguinte, para a temperatura de 850°C, não foram observados valores significativos de retração em relação à composição AFOAFR, porém dentro de um valor médio, houve um aumento da retração para a composição AFOAFR15LAM de aproximadamente, 0,25%.

Para a temperatura de 950°C, observa-se que a composição AFOAFR15LAM foi a que obteve o maior valor de retração linear de queima. Para composição AFOAFR10LAM, observa-se uma mudança brusca nos valores de retração que podem estar relacionados com erros experimentais, ocasionados no momento da sinterização das peças cerâmicas.

Figura 17– Retração Linear de Queima das peças cerâmicas sinterizadas a 750, 850 e 950°C.



Fonte: A Autora, 2019.

4.8 Absorção de Água

Na Figura 18, têm-se os valores de absorção de água dos corpos de provas queimados em 750, 850 e 950 °C. Com relação aos valores de absorção de água das peças queimadas, nota-se que para a temperatura de 750°C todas as composições tiveram uma diminuição de

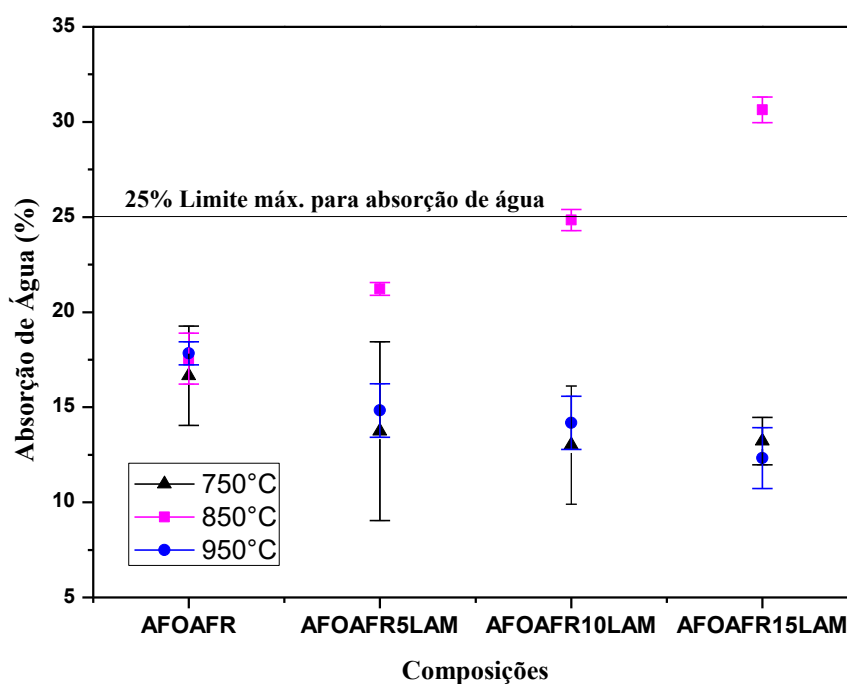
absorção água com relação à formulação AFOAFR.

Para a temperatura de 850°C, houve um aumento da absorção de água com relação à composição AFOAFR, isso pode estar relacionado pelo fato de algumas transformações de fases mais significativas começarem a ocorrer nesta faixa de temperatura, e assim, podendo não favorecer o fechamento da porosidade das peças cerâmicas queimadas (CANDIDO, 2012).

Assim, na temperatura de 950°C, pode-se observar que quanto mais resíduo foi adicionado menor foi a absorção de água, ressalta-se que essa diminuição pode estar relacionada à formação de fase líquida que ocorrem em temperaturas elevadas, diminuindo a porosidade das peças cerâmicas (MOTHÉ, 2008).

Contudo, a formulação de 15% para a temperatura de 850°C foi a única que ultrapassou o limite máximo estabelecido pela NBR 15279-1, as demais formulações estão todas dentro dos limites.

Figura 18 – Absorção de água dos corpos de provas queimados a 750, 850 e 950°C.



Fonte: A Autora, 2019.

4.9 Resistência à Flexão

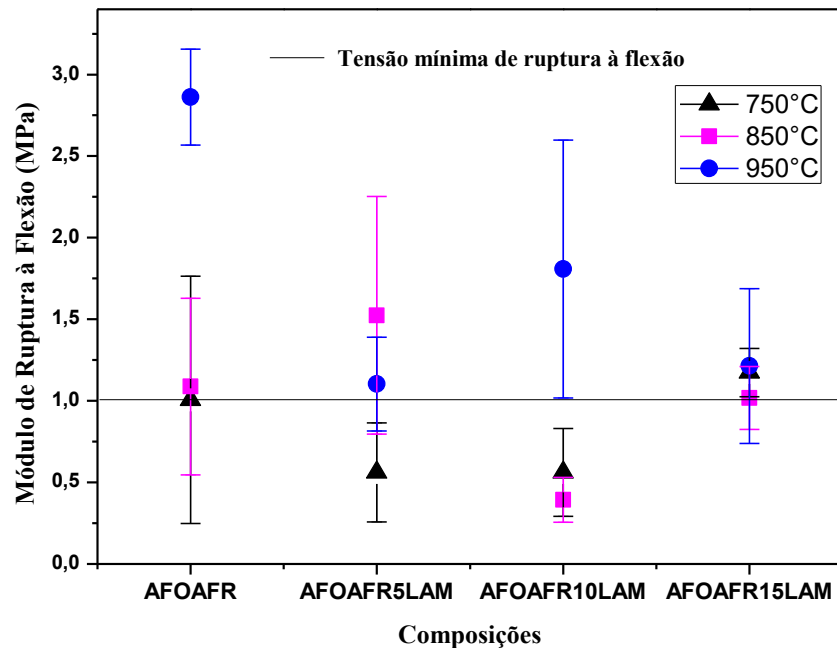
Na Figura 19, apresentam-se os valores de resistência à flexão em três pontos das peças cerâmicas sinterizadas nas temperaturas de 750, 850 e 950°C.

De acordo com a ABNT NBR 15270-1 (2017) de componentes cerâmicos, a tensão mínima de ruptura, após a queima para blocos comerciais de vedação e estruturais, é de 1,0 MPa. Para os valores de resistência à flexão, vale ressaltar que para a temperatura de 750°C, não houve variações significativas para os valores de tensão de ruptura, no entanto as composições de 5 e 10% em peso de resíduo foram as únicas composições que ficaram abaixo dos valores estabelecidos pela norma, assim, podendo estar relacionada com a temperatura de sinterização que não foi o suficiente para que houvesse formação de fase líquida durante a queima das peças cerâmicas (COSTA, 2018).

Para a temperatura de 850°C a composição sem adição do resíduo apresentou valores aceitáveis de módulo de ruptura, para a composição de 5% em peso de resíduo, houve um aumento de aproximadamente 0,5 MPa com relação a composição AFOAFR. No entanto, a composição de 10% em peso de resíduo foi a única que apresentou valores abaixo da tensão mínima, assim, pode-se está relacionada com a baixa interação do resíduo com a matriz aluminossilicato presentes nas argilas e, por fim para a composição de 15% em peso de resíduo as mudanças no módulo de ruptura não foram significativas no entanto ficaram dentro dos valores de tensão mínima (COSTA, 2018).

Por conseguinte, para a temperatura de 950°C a composição de 10 % em peso de resíduo apresentou os melhores resultados para tensão de ruptura à flexão. Todas as composições ficaram dentro dos valores de tensão mínima de ruptura, nessa temperatura, provavelmente, inicia-se a formação de fase líquida, que contribui para a coalescência dos grãos e favorece o fechamento da porosidade das peças cerâmicas (CANDIDO, 2012).

Figura 19 – Resistência à flexão em três pontos



Fonte: A Autora, 2019.

4.10 Avaliação microestrutural

4.10.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam as micrografias obtidas por MEV da região da fratura dos corpos de prova queimados a 750, 850 e 950°C.

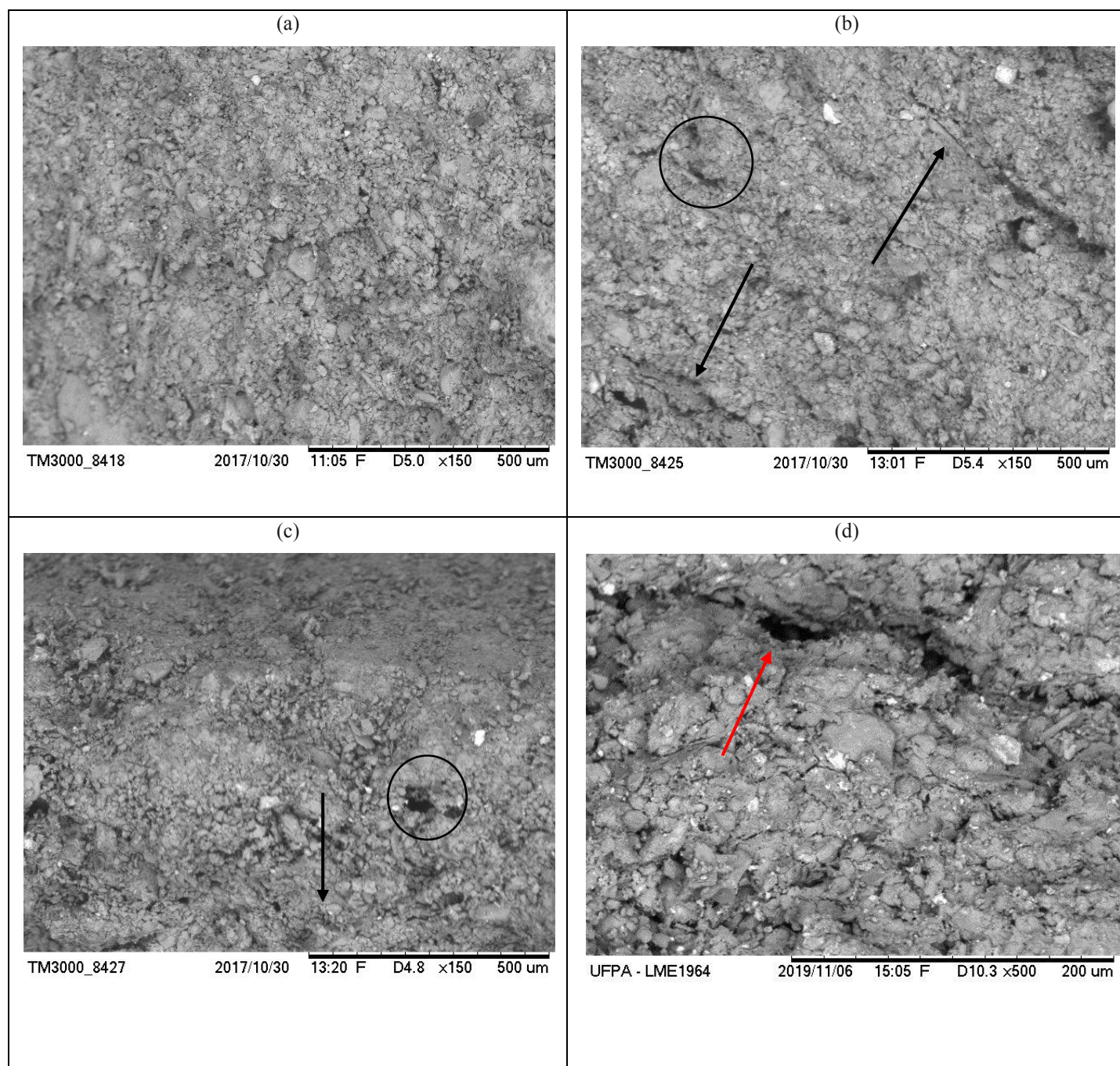
Para as micrografias das peças cerâmicas queimadas neste estudo, não foi possível, observar diferenças na região da fratura. As cerâmicas vermelhas queimadas em temperaturas inferiores a 970°C não apresentam uma consolidação estrutural eficiente, apresentando assim, regiões de porosidade e rugosidade (CANDIDO, 2012).

De forma geral é possível observar uma região de fratura rugosa, com maiores quantidades de defeitos que a cerâmica sem o resíduo como trincas e poros, conforme são mostrados nas Figuras 20, 21 e 22 (b) e (c) respectivamente. As setas indicam as trincas e os círculos correspondem aos poros presentes na região de fratura. Esses defeitos são responsáveis pela redução da resistência das cerâmicas incorporadas com resíduo (VIEIRA *et al*, 2007a).

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura, para a composição

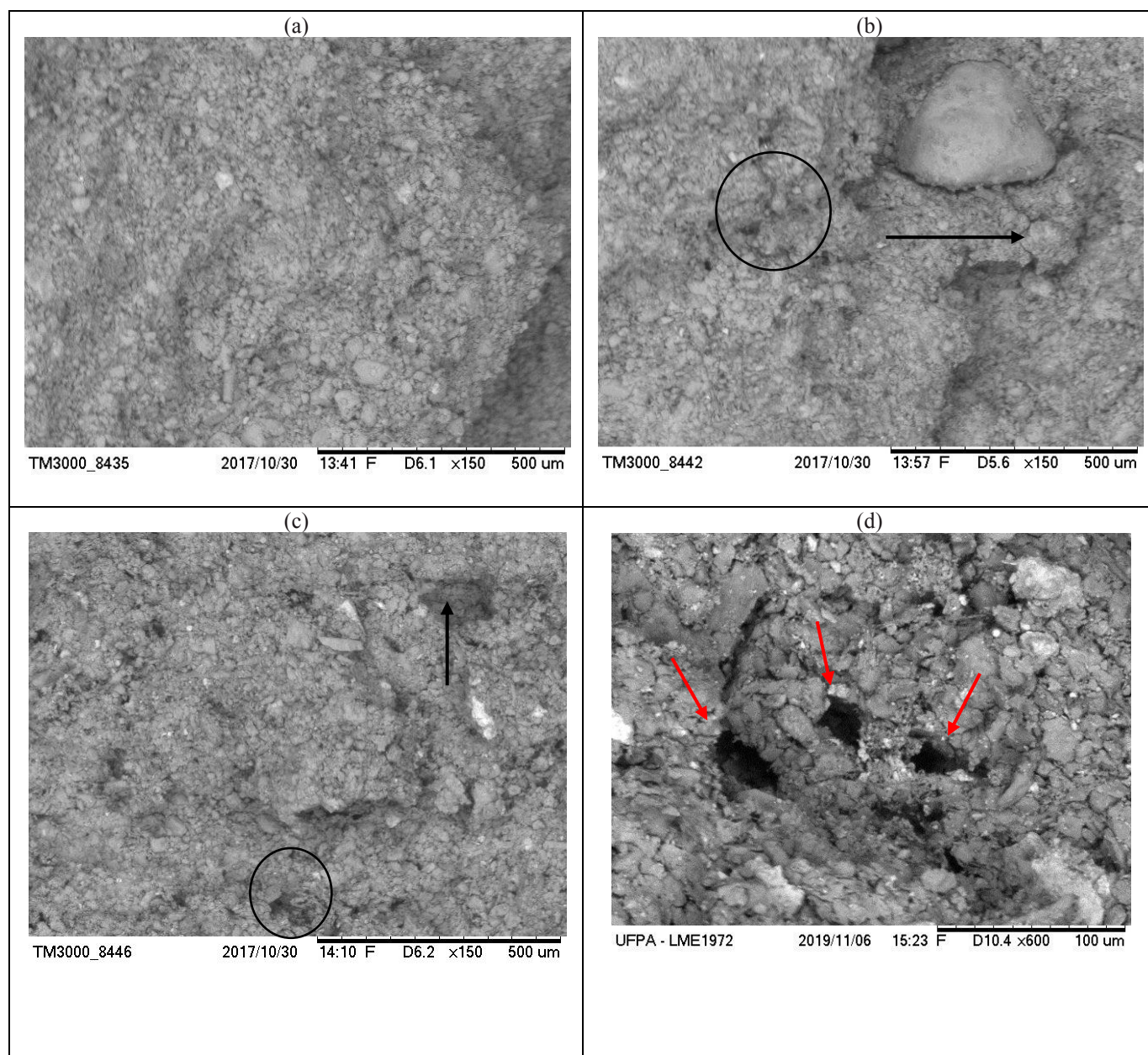
AFOAFR15LAM, e queimadas em diferentes temperaturas, são apresentadas nas Figuras 20 (d), 21 (d) e 22 (d). Com o incremento da quantidade de resíduo incorporado, surgiram mais regiões com falhas (setas pretas). As partículas de coloração mais escuras, que estão indicadas pelas setas vermelhas, podem estar relacionadas à lama de alto forno, que não aderiram à matriz argilosa. Para a Figura 22 (d), é possível observar partículas hexagonais, que podem ter sido induzidas pela alta temperatura de queima, e assim podendo induzir a coalescência dos grãos (CANDIDO, 2012).

Figura 20 – Micrografias obtidas por MEV da composição AFOAFR (a) 150x, AFOAFR5LAM (b) 150x, AFOAFR10LAM (c) 150x e AFOAFR15LAM (d) 500x, queimadas a 750°C.



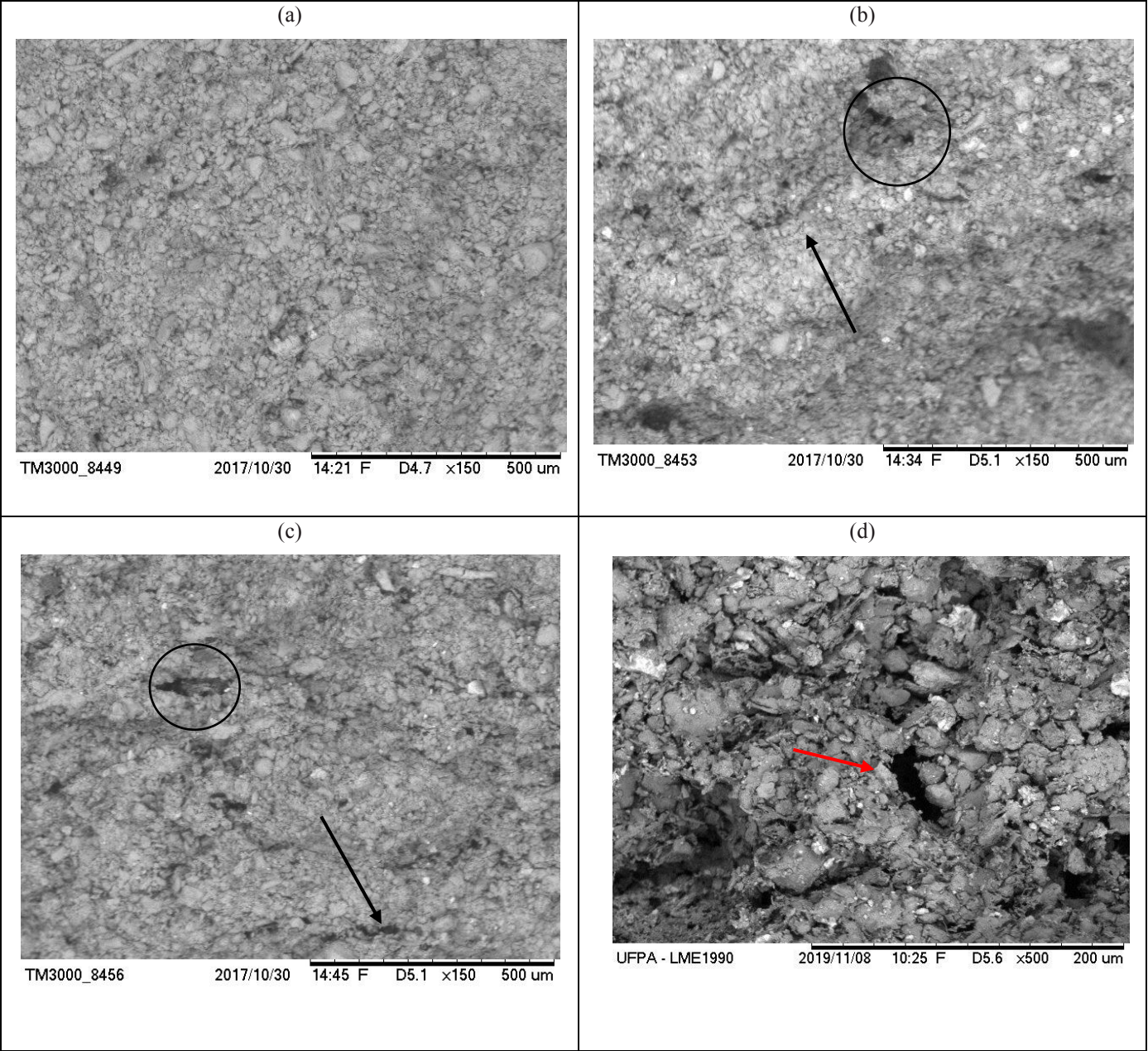
Fonte: A Autora, 2019.

Figura 21 – Micrografias obtidas por MEV da composição AFOAFR (a) 150x, AFOAFR5LAM (b) 150x, AFOAFR10LAM (c) 150x e AFOAFR15LAM (d) 500x, queimadas a 850°C.



Fonte: A Autora, 2019.

Figura 22 – Micrografias obtidas por MEV da composição AFOAFR (a) 150x, AFOAFR5LAM (b) 150x, AFOAFR10LAM (c) 150x e AFOAFR15LAM (d) 500x, queimadas a 950°C.



Fonte: A Autora, 2019.

5 CONCLUSÃO

A utilização da lama de alto forno, como constituinte mássico em argilas para a fabricação de tijolos, é um importante reaproveitamento de uso sustentável que pode ser realizado como bem para toda a comunidade global, e para a indústria civil. Assim, com base nos resultados obtidos através desse estudo, podem-se inferir as seguintes conclusões:

- A caracterização da lama de alto forno mostrou que o resíduo é rico em óxido de ferro e suas principais fases cristalinas são hematita, wustita e magnetita, por ser constituída predominantemente por óxidos de ferro. Dessa forma, o resíduo melhorou a estética das peças cerâmicas queimadas, pelo seu alto teor de óxido de ferro, pode ser um potencial resíduo de uso em argilas, e assim, contribuindo para alcançar valores de resistência mecânica e absorção de água exigidos pela norma para fabricação de tijolos.

- Ressalta-se que as argilas são constituídas por caulinita, quartzo, mica muscovita e anatásio. Por sua vez, as argilas cauliníticas podem conferir uma boa plasticidade ao material, já que a caulinita, é o argilomineral responsável em dar plasticidade ao material em contato com a água

- As análises térmicas, mostraram que as argilas apresentaram transformação de fase da caulinita em metacaulinita.

- As análises feitas por MO, mostrou que as argilas revelaram a presença do mineral micáceo que está relacionado ao quartzo e a presença de minerais ferromagnesianos que está relacionado ao óxido de ferro das argilas, todos os resultados confirmaram o DRX feito das argilas.

- Para as análises por MEV, as micrografias mostraram a presença de partículas que podem estar associadas ao quartzo e aos óxidos de ferro confirmando os resultados de DRX feita do resíduo.

- Para os valores de massa específica aparente a temperatura de 950°C foi a que apresentou maiores valores de massa específica, esses resultados estão associados com a alta temperatura de sinterização que contribuem para o processo de formação de fase líquida, diminuindo a porosidade das peças cerâmicas.

- Para a retração linear de queima não se obteve resultados significativos para a retração.

- Conclui-se, para os valores de absorção de água a temperatura de 950°C que foi a mais alta usada para a sinterização das peças cerâmicas, foram onde as peças obtiveram uma menor absorção de água. Contudo, as formulações de 10 e 15% para a temperatura de 850°C

foram às únicas que ultrapassaram os limites estabelecidos por norma, as demais formulações ficaram dentro dos padrões.

- Para os valores de resistência mecânica a composição de 10% do resíduo na temperatura de 950°C foi a que apresentou melhor desempenho mecânico, esse sendo assim um potencial de uso para a indústria cerâmica. Esse desempenho tecnológico pode estar associado com a elevada temperatura que poderá ter contribuído para a coalescência dos grãos aumentando a resistência mecânica dessa peça cerâmica.

- Assim, nas análises das fraturas feitas por microscopia eletrônica de varredura, com a incorporação do resíduo as peças apresentaram aumento da porosidade e aparecimento de trincas. Além disso, ainda, observam-se partículas não reagidas do resíduo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para a continuação deste trabalho, a incorporação em outros percentuais de lama de alto forno em massa argilosa abaixo de 15% em peso de adição desse resíduo. Verificar outros parâmetros de processo como uma temperatura de sinterização mais elevada à 1050°C e 1150°C, e tempo de queima, tendo como objetivo a redução do custo de produção das peças cerâmicas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Disponível em: <https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acessado em dezembro de 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7170**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983.
- ANDRADE, F. A.; AL-QURESHI, F. A.; HOTZA, D. Modelo matemático aplicado ao processo de extrusão de argilas. **Revista Cerâmica**, v.57, p.180-184, 2011.
- BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica Industrial**, v.5, n.3, p.31-36, Maio/Junho, 2000.
- CALLISTER Jr., W.D. **Ciência e Tecnologia de Materiais**: uma introdução. 7ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2008.
- CANDIDO, V. S. **Utilização de argilito e chamote de blocos de vedação na composição de massa de pavimento intertravado cerâmico - adoquim**. 2012. 156 f. Dissertação de mestrado apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense. 2012.
- COSTA, R. L. S. **Incorporação da lama de alto-forno em cerâmica vermelha para a produção de telhas**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGE/ITEC, da Universidade Federal do Pará, 2018.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/>. Acessado em abril de 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). Siderurgia Brasileira: princípios e políticas. Disponível em: <https://institutoacobrasil.net.br/site/processo-siderurgico/>. Disponível em Junho de 2019.
- LIMA, L. H. M.; REIS, S. C. Aproveitamento de resíduo siderúrgico em blocos cerâmicos

argilosos. **E-xacta**, v.6, n.2, p.69-78, 2013.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Revista Cerâmica**, v.54, p.411-417, 2008.

MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica De Varredura**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Engenharia Mecânica – EMC. Laboratório de Materiais – LABMAT. Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens. Ano: 2016.

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

MODESTO, C.; BRISTOT, V.; MENEGALI, G.; BRIDA, M.; MAZZUCCO, M.; MAZON, A.; BORBA, G.; VIRTUOSO, J.; GASTALDON, M.; OLIVEIRA, A. P. N. Obtenção e Caracterização de Materiais Cerâmicos a partir de Resíduos Sólidos Industriais. **Cerâmica Industrial**, v.8, n.4, p.14-18, Julho/Agosto, 2003.

MORENO, M. M. T. **ARGILAS: Composição Mineralógica, Distribuição Granulométrica e Consistência de Pastas**. 2012. 125 f. Tese de Doutorado para obtenção do título Livre-Docente em Argilas para Cerâmica - Instituto de Geociências e Ciências Exatas-UNESP, Rio Claro, 2012.

MOTHÉ, A.V. **UTILIZAÇÃO DA LAMA DE ALTO-FORNO EM CERÂMICA VERMELHA**. 2008. 109 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL, M. Jr. As Matérias-Primas Cerâmicas, Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Cerâmica Industrial**, v.6, n.2, p.28-39, Março/Abril, 2001.

MOURÃO, M. B. **Siderurgia para não Siderurgistas**. 9 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2004.

NORTON, F. H.; **Introdução à tecnologia cerâmica**, 2ª. Ed. Edgard Blücher: São Paulo, 1987.

OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA, J. N. F. Análise do impacto ambiental causado pela utilização de resíduo sólido do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v.50, n.1, p.185-189, 2004.

SANCHEZ, E.; GARCÍA, J.; GINÉS, F.; NEGRE, F. Aspectos a Serem Melhorados nas Características e Homogeneidade de Argilas Vermelhas Empregadas na Fabricação de Placas Cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v.1, n.3, p.13-22, Julho/Agosto, 1996.

SANTOS, P. S. (1989). **Ciência e Tecnologia das Argilas**. 2 ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher. v. 01, 408p.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**, Volume 2 Ed. V.1, Edgard Blücher LTDA, 1989.

SILVA, A. B. **Reaproveitamento da lama de aciaria com baixo teor de ferro metálico na fabricação de cerâmica vermelha**. 2006. 98 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Ouro Preto, 2006.

VIEIRA, C. M. F.; DIAS, C. A. C. M.; MOTHÉ, A. V.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v.53, n.1, p.381-387, 2007.

VIEIRA, C. M. F.; INTORNE, S. C.; VERNILLI, F. Jr.; MONTEIRO, S. N. Cerâmica vermelha incorporada com lama fina de aciaria. **Revista Matéria**, v.12, n.2, p.269-275, 2007.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. “Incorporation of solid wastes in red ceramics – an update review”. **Revista Matéria**, v. 14, n. 3, pp. 881-905, 2009.

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