



INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DA LAMA DE ALTO FORNO EM MASSA CERÂMICA PARA A PRODUÇÃO DE TELHAS

Roberta Lima de Souza Costa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientadora: Verônica Scarpini Candido

Belém

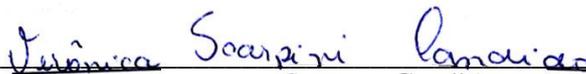
Março de 2018

**INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DA LAMA DE ALTO FORNO EM
MASSA CERÂMICA PARA A PRODUÇÃO DE TELHAS**

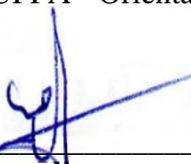
Roberta Lima de Souza Costa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



Prof.^a. Verônica Scarpini Candido, Dra. Sc.
(PPGEP/ITEC/UFPA - Orientadora)



Prof. Edinaldo José de Sousa Cunha, D. Eng.
(PPGEP/ITEC/UFPA - Membro)



Prof. Alisson Clay Rios da Silva, D. Sc.
(FEMAT/UFPA - Membro)



Prof. Laércio Gouvêa Gomes, D. Sc.
(PPGEMAT/UFPA - Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

MARÇO DE 2018

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA**

Costa, Roberta Lima de Souza, 1978-

Influência da incorporação da lama de alto forno em massa cerâmica para a produção de telhas /Roberta Lima de Souza Costa.- 2018.

Orientadora: Verônica Scarpini Candido

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Belém, 2018

1. Telhas- Fabricação 2. Cerâmica (Tecnologia) 3. Resíduos industriais I. Título

CDD 22.ed.666.732

Este trabalho é dedicado, primeiramente, a Deus que sempre foi meu refúgio e minha fortaleza. Em especial a minha família pelo incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e forças pra concluir esta dissertação.

A minha família que me apoiou nessa jornada, entendendo a minha ausência no seio familiar.

A professora Dra. Verônica Scarpini pelo empenho e dedicação na minha orientação e por compartilhar com esta aluna, de seu conhecimento e experiência acadêmica.

A Maria Celis Pinheiro da Silva por ter me incentivado a voltar a estudar e pelo companheirismo ao longo da nossa amizade.

A minha mãe Jaciara Lima, meu pai Jorge Nobre, meu filho Mauro Filho, meu esposo Vicente Costa e a minha cunhada Karoline Alkimim por terem acompanhado meu filho caçula Victor Costa, nos dias em que precisei assistir as aulas do mestrado e realizar os ensaios laboratoriais necessários para este trabalho, amo vocês.

A Cerâmica Menegalli por ter cedido a matéria prima para realizar esse estudo.

Ao Sr. Augusto Fernando de Freitas Costa por ter me auxiliado no laboratório e pela amizade que ali nascia.

Ao técnico Sr. Joel Martins por ter orientado nos ensaios no Laboratório de Engenharia Civil – UFPA.

Aos demais laboratórios de realização dos ensaios descritos neste trabalho, meu muito obrigada.

A todos que me ajudaram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho. Muito obrigada!

“Não importa o quanto a vida possa ser ruim, sempre existe algo que você possa fazer e triunfar”

(Stephen Hawking)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DA LAMA DE ALTO FORNO EM MASSA CERÂMICA PARA A PRODUÇÃO DE TELHAS

Roberta Lima de Souza Costa

Março/2018

Orientadora: Verônica Scarpini Candido

Área de Concentração: Engenharia de Processos

A utilização de resíduos na composição mássica argilosa para produção de peças cerâmicas tem sido amplamente estudada, pois tem-se observado uma melhora significativa nas propriedades químicas e físicas dos materiais finais. Assim, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência da incorporação de 5 e 10% em peso de lama de alto forno na massa argilosa, ambas provenientes do estado do Pará. A matéria-prima e o resíduo foram inicialmente beneficiados a fim de diminuir o tamanho das partículas e, posteriormente, passados em peneira com abertura de malha igual a 325 *mesh*. Após essa etapa, o resíduo e a matéria-prima foram submetido a ensaios de FRX, EDS, DRX, TG/DTG, distribuição dos tamanhos das partículas, MO, MEV e determinação do limite de plasticidade e liquidez. Foram preparados corpos de prova por prensagem uniaxial de 20 Mpa para queima em um forno de laboratório, do tipo mufla, nas temperaturas de 750, 850 e 950°C. Foram avaliados, MEA, PA, AA, RLQ e resistência à flexão de três pontos. A microestrutura das cerâmicas queimadas foram avaliadas por MO, MEV e DRX. Os resultados mostraram que a lama de alto forno é constituída predominantemente de compostos de ferro, que contribui na colocação avermelhada na peça sinterizada. O resíduo apresenta uma granulometria favorável a adição em massa argilosa, não alterando as propriedades tecnológicas. Assim, conclui-se que a composição com adição de 5% de lama de alto forno foi a que apresentou resultados favoráveis e exigidos por normas para a fabricação de telhas.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

INFLUENCE OF THE INCORPORATION OF THE MUD OF HIGH OVEN IN CERAMIC MASS FOR THE PRODUCTION OF TILES

Roberta Lima de Souza Costa

March/2018

Advisor: Verônica Scarpini Candido

Research Area: Process Engineering

The use of residues in the clay-based ceramic composition for the production of ceramics has been widely studied, since a significant improvement in the chemical and physical properties of the final materials has been observed. The aim of this work is to evaluate the influence of the incorporation of 5 and 10 wt. % of blast furnace sludge into the clay slag, both from the state of Pará. The raw material and the waste were initially benefited in order to reduce the particle size and subsequently passed through a sieve with a mesh opening equal to #325. After this step, the residue and the raw material were submitted to FRX, EDS, XRD, TG / DTG, particle size distribution, MO, SEM and determination of plasticity and liquidity limits. Test specimens were prepared by uniaxial pressing of 20 Mpa for burning in a muffle-type laboratory oven at temperatures of 750, 850 and 950°C. MEA, PA, AA, RLQ and three-point flexural strength were evaluated. The microstructure of the burnt ceramics was evaluated by OM, MEV and XRD. The results showed that the blast furnace slurry consists predominantly of iron compounds, which contributes to the reddish placement in the sintered part. The residue presents a granulometry favorable to the addition in clayey mass, not altering the technological properties. Thus, it was concluded that the composition with addition of 5% of blast furnace sludge was the one that presented favorable results and required by standards for the manufacture of tiles.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 - OBJETIVOS.....	4
1.2.1 - Objetivo geral.....	4
1.2.2 - Objetivos específicos.....	4
1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1 - MATERIAIS CERÂMICOS.....	6
2.1.1 - Argila.....	6
2.1.1.1 - Constituintes da argila.....	7
2.2 - CERÂMICA VERMELHA.....	9
2.2.1 - Processo de fabricação da cerâmica vermelha.....	10
2.2.1.1 - Preparação da massa.....	10
2.2.1.2 - Conformação.....	11
2.2.1.3 - Corte.....	12
2.2.1.4 - Secagem e queima.....	12
2.3 - POLO CERÂMICO NO ESTADO DO PARÁ.....	15
2.4 - TELHAS.....	15
2.5 - RESÍDUO SÓLIDOS.....	19
2.5.1 - Resíduos siderúrgicos.....	20
2.5.2 - Lama de alto forno.....	21
2.6 - INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO EM CERÂMICA VERMELHA.....	22
2.7 - INCORPORAÇÃO DE LAMA DE ALTO FORNO EM CERÂMICA VERMELHA.....	24
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS.....	27
3.2 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	28
3.2.1 - Beneficiamento dos Materiais.....	29
3.2.2 - Caracterização dos Materiais.....	29
3.2.2.1 - Análise química.....	29
3.2.2.2 - Difração de raios-x (DRX).....	29

3.2.2.3 - Análises TG/DTG.....	30
3.2.2.4 - Distribuição dos tamanhos das partículas.....	30
3.2.2.5 - Morfologia ótica (MO).....	31
3.2.2.6 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	31
3.2.3 - Preparação das composições.....	32
3.2.4 - Índice de plasticidade (IP).....	32
3.2.5 - Conformação dos corpos de prova.....	33
3.2.5.1 - Secagem dos corpos de prova.....	34
3.2.5.2 - Sinterização e ensaio dos materiais.....	34
3.2.6 - Determinação das propriedades dos materiais cerâmicos.....	35
3.2.6.1 - Porosidade aparente.....	35
3.2.6.2 - Absorção de água.....	36
3.2.6.3 - Massa específica aparente.....	36
3.2.6.4 - Retração linear de queima	37
3.2.6.5 - Determinação da resistência a flexão.....	37
3.2.7 - Avaliação microestrutural.....	38
3.2.7.1 - Microscopia ótica	38
3.2.7.2 - Microscopia eletrônica de varredura	38
3.2.7.3 - Difração de raios-x.....	38
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1 - CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E DO RESÍDUO.....	40
4.1.1 - Caracterização química.....	40
4.1.1.1 - Fluorescência de raios-x da lama de alto forno e espectrometria de raios-x das argilas.....	40
4.1.2 - Caracterização mineralógica.....	41
4.1.2.1 - Difratometria de raios-x das argilas e do resíduo.....	41
4.1.2.2 - Termogravimetria das argilas e da lama de alto forno.....	43
4.1.3 - Caracterização física.....	45
4.1.3.1 - Distribuição do tamanho das partículas das argilas, da lama de alto forno e das composições.....	45
4.1.4 - Caracterização morfológica.....	48
4.1.4.1 - Microscopia ótica.....	48
4.1.4.2 - Microscopia eletrônica de varredura.....	49

4.1.5 - Propriedades físicas e mecânicas.....	50
4.1.5.1 - Plasticidade.....	50
4.1.5.2 - Massa específica aparente das peças queimadas.....	51
4.1.5.3 - Porosidade aparente.....	52
4.1.5.4 - Absorção de água.....	52
4.1.5.5 - Retração linear de queima.....	53
4.1.5.6 - Resistência à flexão.....	55
4.1.6 - Microscopia dos corpos de prova sinterizados.....	56
4.1.6.1 - Microscopia ótica.....	56
4.1.6.2 - Microscopia eletrônica de varredura.....	59
4.1.7 - Difração de raios-x dos corpos de prova sinterizados.....	61
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	64
5.1 - CONCLUSÕES	64
5.2 - SUGESTÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fluxograma do processo de produção da cerâmica vermelha.....	10
Figura 2.2	Telha romana.....	16
Figura 2.3	Telha francesa ou marselha.....	17
Figura 2.4	Telha portuguesa.....	17
Figura 2.5	Telha plan.....	18
Figura 2.6	Telha colonial.....	18
Figura 2.7	Telha termoplan.....	18
Figura 2.8	Telha germânica.....	19
Figura 2.9	Fluxograma do sistema de limpeza de gases de alto forno.....	22
Figura 3.1	Local de armazenamento das argilas utilizadas.....	27
Figura 3.2	Lama de alto forno cedida pela siderúrgica.....	27
Figura 3.3	Fluxograma experimental utilizado.....	28
Figura 3.4	Matriz de aço utilizada na conformação das massas argilosas....	33
Figura 3.5	Apresentação do corpo de prova já conformado.....	34
Figura 3.6	(a) forno tipo mufla e a (b) corpos de prova após a sinterização	35
Figura 4.1	Difratograma de raios-x da AFO. C = caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A= anatásio.....	41
Figura 4.2	Difratograma de raios-x da AFR. C = caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A = anatásio.....	42
Figura 4.3	Difratograma de raios-x da LAF. Ca: calcita, Es: espinélios, Go: goetita, H: hematita M: magnetita, Q: quartzo, W: wustita, C: caulinita.....	43
Figura 4.4	Curvas TG/DTG da AFO.....	44
Figura 4.5	Curvas TG/DTG da AFR.....	44
Figura 4.6	Curvas TG/DTG da LAF.....	45
Figura 4.7	Curva de distribuição do tamanho das partículas das AFO, AFR e LAF.....	46
Figura 4.8	Curva de distribuição do tamanho das partículas das composições estudadas.....	47
Figura 4.9	Diagrama de Winkler para AFO, AFR e LAF.....	48

Figura 4.10	Micrografias obtidas por MO das argilas. (a) AFO e (b) AFR; (c) LAF.....	49
Figura 4.11	Micrografias obtidas por MEV das argilas. (a) AFO e (b) AFR; (c) LAF.....	50
Figura 4.12	Prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg.....	51
Figura 4.13	Porosidade aparente dos corpos de prova queimados nas temperaturas 750, 850 e 950°C.....	53
Figura 4.14	Absorção de água dos corpos de prova queimados nas temperaturas 750, 850 e 950°C.....	54
Figura 4.15	Retração linear de queima dos corpos de prova queimados nas temperaturas 750, 850 e 950°C.....	55
Figura 4.16	Resistência à flexão de queima dos corpos de prova queimados nas temperaturas 750, 850 e 950°C.....	56
Figura 4.17	Micrografia obtida por MO na queima de 750°C, (a) AFOAFR; (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.....	57
Figura 4.18	Micrografia obtida por MO na queima de 850°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.....	58
Figura 4.19	Micrografia obtida por MO na queima de 950°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.....	58
Figura 4.20	Micrografia obtida por MEV na queima de 750°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.....	59
Figura 4.21	Micrografia obtida por MEV da queima de 850°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.....	60
Figura 4.22	Micrografia obtida por MEV da queima de 950°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.....	61
Figura 4.23	Difratograma de raios-x da queima de 750°C. Q = Quartzo; M = Mica muscovita e H = Hematita.....	62
Figura 4.24	Difratograma de raios-x da queima de 850°C. Q = Quartzo; M = Mica muscovita e H = Hematita.....	62
Figura 4.25	Difratograma de raios-x da queima de 950°C. Q = Quartzo; M = Mica muscovita e H = Hematita.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Transformações química e física durante o processo de queima..	14
Tabela 3.1	Composição em peso dos materiais utilizados. Argila Forte (AFO), Argila Fraca (AFR) e Lama de alto forno (LAF).....	32
Tabela 4.1	Composição química da LAF, AFR e AFO.....	40
Tabela 4.2	Massa específica aparente dos corpos de provas queimados a 750, 850 e 950°C.....	52

NOMENCLATURA

AA	ABSORÇÃO DE ÁGUA
ABCERAM	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA
ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
AFO	ARGILA FORTE
AFR	ARGILA FRACA
AFOAFR	ARGILA FORTE ARGILA FRACA
AFOAFR5LAF	ARGILA FORTE, ARGILA FRACA E 5% ADIÇÃO DE LAMA DE ALTO FORNO
AFOAFR10LAF	ARGILA FORTE, ARGILA FRACA E 10% ADIÇÃO DE LAMA DE ALTO FORNO
AG	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
ANICER	ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDUSTRIA CERÂMICA
ASTM	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
AT	ANÁLISE TÉRMICA
CPs	CORPOS DE PROVAS
DRF	DETRMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO
DRX	DIFRATOGRAMA DE RAIOS X
EDS	ESPECTOMETRIA DE RAIOS-X
ETA	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
FRX	FLUORESCENCIA DE RAIOS X
IAB	INSTITUTO AÇO BRASIL
IBS	INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA
IP	ÍNDICE DE PLASTICIDADE
LAF	LAMA DE ALTO FORNO
LL	LIMITE DE LIQUIDEZ
LP	LIMITE DE PLASTICIDADE
MEA	MASSA ESPECÍFICA APARENTE
MPa	MEGA PASCAL
MEV	MICROSCOPOIA ELETRÔNICA DE VARREDURA
MO	MICROSCOPIA ÓTICA
MRF	MÓDULO DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO

NBR	NORMA BRASILEIRA
PA	POROSIDADE APARENTE
PF	PERDA AO FOGO
RLQ	RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA
SEBRAE	SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICROS E PEQUENAS EMPRESAS
TG	TERMOGRAVIMETRIA
DTG	TERMOGRAVIMETRIA DERIVADA

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - MOTIVAÇÃO

As indústrias vêm buscando alternativas viáveis para não realizar o descarte incorreto de seus resíduos, seja reaproveitando-os em seu processo ou adicionando-os em outros processos industriais, como por exemplo o da cerâmica vermelha. Assim como a principal matéria-prima da cerâmica vermelha é a argila então a adição de resíduos faz com que a exploração desse recurso natural não renovável seja o menor possível.

Cerâmicos são materiais inorgânicos formados, geralmente, por metais e ametais que estão ligados entre si por ligações predominantemente iônica e, eventualmente, algumas ligações covalentes (CALLISTER, 2012). Os materiais cerâmicos podem ser classificados como: materiais refratários, materiais de revestimento, isolantes térmicos, fritas e corantes, abrasivos, vidro cimento e cal, cerâmicas avançadas, cerâmica branca e cerâmica vermelha (ABCERAM, 2017).

Dentre esses diversos tipos de cerâmica, a cerâmica vermelha possui grande importância no cenário nacional, pois é o ramo industrial que produz blocos, tijolos, telhas, argilas expandidas e pisos intertravados. Estima-se que o faturamento anual desse setor se aproxime de 18 bilhões de reais gerando cerca de 293 mil empregos diretos e 900 mil indiretos (ANICER, 2017).

A indústria da cerâmica vermelha por muito tempo utilizou de métodos empíricos para a fabricação das peças. Devido a isso, problemas durante a secagem e a queima, problemas dimensionais e de resistência se tornaram comuns no processo produtivo (VIEIRA *et al.*, 2004). Atualmente, observa-se que em muitas cerâmicas, há uma maior preocupação em formular composições que apresentem melhores parâmetros tecnológicos e há maior controle de qualidade do produto final. Essas mudanças no processo produtivo proporcionam maior economia de energia e maior lucro no produto final (RAMOS, 2006).

Para a produção das peças de cerâmica vermelha, são utilizados recursos naturais não renováveis como argila e areia. Como as matérias-primas são materiais naturais, a dosagem errada ou a falta de algum mineral pode acarretar em peças com

elevados percentuais de absorção de água e baixa resistência mecânica. Por esse motivo, a incorporação de resíduos sólidos tem se mostrado como uma alternativa viável para melhorar as propriedades tecnológicas das cerâmicas vermelhas e um destino final ambientalmente correto para esses materiais (VIEIRA e MONTEIRO, 2009).

Diversos são os tipos de resíduos que podem ser incorporados em massa argilosa para produção de peças de cerâmica vermelha e os resultados sobre as propriedades tecnológicas têm se mostrado positivos. PINHEIRO *et al.* (2008) avaliaram o efeito da adição de resíduos provenientes da produção de papel em massa cerâmica e observaram que a adição de 10% em peso de resíduo provocou um aumento na absorção de água com consequente diminuição da resistência à flexão. Os autores concluíram que a adição de até 3% em peso de resíduo contribuiu para a diminuição da absorção e aumento da resistência.

Já MONTEIRO *et al.* (2007) estudaram o efeito da adição de resíduos da extração do petróleo em matriz de cerâmica vermelha para produção de tijolos e telhas em escala industrial e concluíram que a adição de até 5% em peso não alterou significativamente a absorção de água, a resistência mecânica e a retração de queima. Os autores concluíram também, que a adição desse tipo de resíduo melhorou a trabalhabilidade das massas cerâmicas durante a extrusão podendo contribuir para melhorar o processamento das peças.

Dentre os diversos tipos de resíduos que são incorporados à cerâmica vermelha destacam-se os resíduos de siderurgia (DAS *et al.*, 2006). Esses resíduos são gerados a partir do beneficiamento de insumos primários para a produção do aço e, quando são descartados incorretamente, podem causar problemas ambientais irreversíveis. Nessa atividade diversos tipos de resíduos sólidos são gerados, dentre eles destaca-se a lama de alto forno e os resíduos finos conhecidos como pó de balão e pó de despoeiramento. Esses resíduos são ricos em óxidos ferro e possuem elevados teores em óxidos de sílica (Fe_2O_3 e SiO_2) e óxidos fundentes (BOSCO, 2009).

Dados do INSTITUTO AÇO BRASIL (2017) registram que o Brasil tem um parque siderúrgico representado por 14 empresas privadas, controladas por onze grupos empresariais e operando 30 usinas distribuídas por 10 estados brasileiros, a indústria do aço no Brasil foi responsável pela produção, em 2016, de 31,3 milhões de toneladas de aço bruto, levando o país a ocupar a 9ª posição no ranking da produção mundial.

A lama de alto forno é gerada a partir da produção de ferro gusa, material com alto teor de carbono (COLPAERT, 2008). O conhecimento da composição química

desse resíduo é de extrema importância para a decisão de descarte correto no ambiente ou reaproveitamento no próprio processo produtivo. Os resíduos de siderurgia podem conter metais pesados como Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg) e Arsênio (As) que são prejudiciais ao ambiente e que quando incorporados em cerâmica vermelha, por exemplo, podem ser inertizados (MAKKONEN *et al.*, 2002).

SOUZA *et al.* (2008) estudaram o efeito da adição de resíduo de siderurgia em cerâmica vermelha e concluíram que o resíduo diminuiu a porosidade da massa quando adicionado em até 10% em peso. Além disso, os autores observaram que a adição do resíduo contribuiu para o incremento de hematita conferindo uma coloração mais avermelhada à cerâmica sinterizada.

VIEIRA e colaboradores (2007) realizaram o estudo da granulometria da lama de alto forno e concluíram que ela é apropriada para a incorporação em massa cerâmica. Os autores também concluíram que o resíduo pode contribuir na economia energética na etapa de queima da cerâmica. Dessa forma, destaca-se que a caracterização da lama de alto forno é de extrema importância, pois busca fornecer subsídios para a compreensão da sua utilização com as cerâmicas argilosas (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

DONATO (2008) diz que com o processo de industrialização e desenvolvimento de novas tecnologias, a geração de resíduos se tornou algo inerente ao processo produtivo, isso contribui para que as empresas utilizem a Logística Verde que tem como objetivo principal a atender os princípios da sustentabilidade.

Diversos tipos de resíduos são produzidos e as formas de descarte por vezes são ineficientes ou inadequadas. JUNKES (2011) ressalta que nos últimos anos, a reutilização de vários resíduos sólidos vem crescendo e a utilização desses materiais como constituintes mássicos em cerâmica vermelha é uma alternativa viável para descartar sem agredir o ambiente e melhorar as propriedades das peças cerâmicas.

DIAS (2011) relata que o estudo sobre a influência da lama de alto forno no comportamento tecnológico de massas argilosas sinterizadas torna-se importante pois pouco é a utilização desse resíduo para a produção de artefatos cerâmicos com possível aplicação no setor da construção civil.

Dessa forma, justifica-se esse trabalho do ponto de vista ambiental, pois a incorporação lama de alto forno em massa cerâmica é uma alternativa ambientalmente correta de descarte para o resíduo.

Do ponto de vista científico, ressalta-se a importância de caracterizar esse resíduo para que se possa correlacionar suas propriedades com as das telhas.

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 – Objetivo geral

Assim, este trabalho tem por objetivo de avaliar a influência da incorporação de 5 e 10% em peso de lama de alto forno, proveniente de uma siderúrgica do estado do Pará, na massa argilosa composta de argila forte e argila fraca, cedida pela Cerâmica Menegalli, empresa localizada no município de São Miguel do Guamá-PA, para a produção de telhas.

1.2.2 – Objetivos específicos

Mais especificadamente, objetiva-se:

- Estudar as propriedades físicas e químicas do resíduo das argilas e do resíduo;
- Avaliar o comportamento térmico e a microestrutura das argilas e do resíduo;
- Realizar um estudo sobre a composição mássica e preparar composições com adição individual de 5 e 10% em peso de lama de alto forno a uma massa argilosa composta por uma argila forte (argila de elevada plasticidade) e uma argila fraca (argila de baixa plasticidade);
- Avaliar a influência da adição do resíduo nas propriedades físicas, químicas e mecânicas de massas cerâmicas;
- Estudar a morfologia e microestruturas das cerâmicas sinterizadas, através do MO, MEV e DRX.

1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Destaca-se que são poucos os estudos sobre a lama de alto forno e sua interação com as massas argilosas para produção de cerâmica vermelha no estado do Pará, podendo este estudo, contribuir para geração de dados inéditos acerca das propriedades físicas, químicas, térmicas e mecânicas do resíduo, após sua adição nas peças cerâmicas.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O atual capítulo apresenta a motivação, os objetivos, contribuições da dissertação e a organização do trabalho com informações relacionadas à resíduos siderúrgicos e a sua incorporação em massa argilosa.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre materiais cerâmicos e cerâmica vermelha no qual são abordados o processo de fabricação da cerâmica, bem como se faz uma revisão bibliográfica dos tipos de telhas e suas diversidades dando ênfase às telhas cerâmicas. O capítulo aborda também uma revisão da literatura sobre resíduos sólidos, siderúrgicos, e a incorporação da lama de alto forno em massa argilosa.

O capítulo 3 apresenta os materiais e metodologia utilizados no desenvolvimento da pesquisa, dando realce nos equipamentos utilizados e normas consultadas.

O capítulo 4 foi reservado aos resultados e discussão obtidos no decorrer dos experimentos realizados.

No capítulo 5 apresenta conclusões e sugestões para trabalhos posteriores relacionados ao tema em questão.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 – MATERIAIS CERÂMICOS

Segundo a ABCERAM (2017), material cerâmico é todo material de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, excetuados os metais e suas ligas, que são utilizáveis geralmente pelo tratamento em temperaturas elevadas.

Alguns materiais são constituídos exclusivamente por matérias-primas naturais como: argila, caulins, cromita, feldspato, magnesita, quartzitos, talcos e outras (CASTRO, 2008). Para JORDÃO (1988) outros materiais cerâmicos podem apresentar em sua constituição algumas matérias-primas sintéticas como o carbetto de silício (SiC); agrupadas em óxidos podendo ser óxidos simples como a alumina (Al_2O_3), berília (óxido de berílio - BeO) e etc.

Os materiais cerâmicos, em geral, apresentam elevada resistência ao calor, considerável resistência a oxidação e ao ataque químico, elevada resistência a deformação plástica e alta rigidez mecânica, além de normalmente serem bons isolantes térmicos e elétricos (SILVA, 2000). Também estes materiais possuem, em geral, baixa resistência ao impacto, e grande variação da resistência à fratura (DIAS, 2011).

2.1.1 – Argila

GRIM (2003) diz que as argilas são materiais naturais, terrosos, de granulação fina, que geralmente adquirem, quando umedecidos com água, certa plasticidade. O termo argila é empregado para designar um material inorgânico natural, de aspecto terroso, de comportamento plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água (FEITOSA, 2015). Por plasticidade entende-se que é capacidade do material cerâmico ser moldado após ter sido adicionado água a sua composição (CANDIDO, 2012).

Para ORDOÑEZ (2015) na geologia das argilas e em várias partes do mundo existem argilas de natureza diferentes. Não existem duas jazidas que tenham exatamente a mesma argila, como também diferentes amostras de argila tomadas na mesma jazida podem apresentar diferenças. Segundo o autor as argilas são formadas por alteração

durante processos de envelhecimento e intemperismo de rochas que contêm minerais como feldspato, mica e quartzo e podem ser transportadas à distâncias consideráveis por efeito da água de chuva, rios, vento etc.

COELHO *et al.* (2007) relatam que a argila é uma rocha constituída essencialmente por um grupo de minerais que recebem o nome de argilominerais.

A argila se origina a partir de modificações de minerais da rocha de origem pela atuação da água das chuvas, auxiliadas pelos ácidos provenientes da decomposição de restos vegetais (MAIA, 2012).

Do ponto de vista sedimentológico e granulométrico, a fração argila corresponde ao conjunto de partículas inferiores a $1\mu\text{m}$ ou $2\mu\text{m}$, ou seja, diâmetro esférico equivalente (d.e.e) $\leq 1\mu\text{m}$ ou $2\mu\text{m}$ (GOMES, 1988).

Fenômenos de separação, mistura e contaminação com outros minerais e matéria orgânica mudam as características originais da argila, diferenciando da rocha original. Essas argilas são conhecidas como sedimentares ou secundárias. Se os produtos desses processos não são transportados para longe da rocha mãe, esses depósitos de argila são conhecidos como primários ou argilas residuais (CLEWS, 1969; LEE, 1969).

As argilas são queimadas a temperaturas entre $800-1250^{\circ}\text{C}$ e apresentam coloração avermelhada pela presença de óxidos de ferro na forma de hematita. A mistura das argilas classificadas como plásticas (argilas fortes ou gordas) e pouco plásticas ou não plástica (argilas fracas ou magras) normalmente são usadas para fabricação de cerâmica. (MOTTA *et al.*, 2001).

2.1.1.1 – Constituintes da argila

As argilas podem ser constituídas de acordo com os grupos abaixo, segundo MUKHERJEE (2013):

- Argilominerais: contribuem para a plasticidade na argila. Os mais habitualmente encontrados nas argilas são caulinita, ilita e esmectita;
- Minerais associados: não oferecem plasticidade à argila. Alguns exemplos são óxidos, carbonatos e silicatos como quartzo e feldspato;
- Fases associadas: são componentes não minerais, como substâncias amorfas e substâncias orgânicas. Alguns exemplos são silicatos amorfos ou húmus como um constituinte orgânico do solo.

Os argilominerais são geralmente formados por lamelas constituídas por estratos ou lâminas de tetraedros de SiO_4 e octaedros de $\text{Al}(\text{OH})_6$, possuindo cristalinidade variável NBR 6502 (ABNT, 1995). São formadas por alterações de minerais primários das rochas ígneas e metamórficas, como o feldspatos, piroxênios e anfibólios, ou são constituintes de rochas sedimentares NBR 6502 (ABNT, 1995). Possuem a propriedade de absorver às superfícies de suas partículas quantidades variadas de água e íons.

As argilas são constituídas basicamente por óxidos SÁNCHEZ *et al.* (1997) e dentre elas destacam-se:

- Sílica (SiO_2): origina-se tanto do mineral argiloso quanto do quartzo livre e de outros aluminossilicatos. O quartzo aumenta a refratariedade da argila e diminui sua retração de queima. Um aumento na quantidade de sílica pode provocar um eventual aumento de quartzo livre e conseqüentemente a diminuição da resistência mecânica; aumento da permeabilidade, acelerando a secagem; redução na contração de queima, devido ao aumento da refratariedade e expansão do quartzo; melhoria na resistência ao impacto. Maior será a sua plasticidade, quanto menor for a sua quantidade de sílica. Quando o quartzo se apresenta em granulometria relativamente grossa, durante o aquecimento, ao se expandir mais que a argila, irá alterar a textura da peça e provocar redução da resistência mecânica devido à propagação de trincas;
- Alumina (Al_2O_3): é o segundo composto de maior abastamento na argila. Durante a sinterização a alumina e conjunto com a sílica dá lugar a formação de mulita, composto cristalino em forma de agulhas, que aumenta a resistência mecânica das peças. Sua concentração indica a quantidade de inerais argilosos e plasticidade;
- Óxido de ferro (Fe_2O_3): é um dos responsáveis pela coloração avermelhada das peças sinterizadas. Sinterizações abaixo de 1050°C , o óxido férrico encontra-se na forma de hematita (Fe_2O_3), acima desta temperatura transforma-se em magnetita (Fe_3O_4);
- Dióxido de titânio (TiO_2): é encontrado na argila em percentuais de 0,1 a 0,4%, normalmente na forma de rutilo. Também é responsável pela coloração amarelada da argila;
- Óxido de cálcio e magnésio (MgO e CaO): encontram-se nas argilas como carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, sendo mais abundante na forma de

carbonato de cálcio. Atuam como modificadores de fundência, porém prejudicam a tonalidade final do produto;

- Óxido de sódio e potássio (álcalis livres): atuam também como fundentes, o óxido de sódio encontra-se na faixa de 0,5% enquanto o de potássio entre 1,5 e 4%. Nas argilas caulínicas, onde os percentuais desses óxidos não chegam a 1%, a temperatura de queima varia de 1100°C e 1200°C, já com as argilas iliticas os percentuais superam a 5% e as temperaturas variam entre 825 e 850°C. Esses óxidos vitrificam a temperaturas relativamente baixas, 700°C, formando assim vidros mais viscosos. Essa vitrificação continua gradualmente com o aumento da temperatura, acompanhada de uma retração proporcional. É bom salientar que a vitrificação não está associada unicamente com fundentes, mais também com a granulometria das argilas. Altos percentuais de fundentes associados a uma granulometria fina aumentam a velocidade de vitrificação;
- Perda ao fogo (PF): indica a perda de massa em consequência de decomposição de carbonatos, combustão de substâncias orgânicas e sulfatos, decomposição de hidróxidos, perda de água adsorvida, perda de grupos hidroxilas do retículo cristalino dos minerais argilosos.

SANTOS (1989) diz que uma PF entre 6 e 12% pode ser considerada normal, abaixo de 5% indica percentuais relativamente altos de inerte, principalmente como o quartzo.

2. 2 – CERÂMICA VERMELHA

Cerâmica Vermelha é uma expressão com significado amplo, compreendendo aqueles materiais com coloração avermelhadas empregadas na construção civil (tijolos, blocos, elementos vazados, lajes, telhas e tubos cerâmicos) e alguns de uso doméstico e afins (ABCERAM, 2017). Utiliza-se neste setor basicamente somente a argila comum no processo industrial (MOTTA *et al.*, 2001) e essas argilas, em sua grande maioria, são caulinito-iliticas, cujos componentes principais são os argilominerais (silicatos hidratados de alumínio), matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio (IDROGO *et al.*, 2011).

O Brasil dispõe de importantes jazidas de minerais industriais de uso cerâmico, cuja produção está concentrada principalmente nas regiões sudeste e sul, onde estão localizados os maiores polos cerâmicos do país (IDROGO *et al.*, 2016). No entanto,

outras regiões têm apresentado certo desenvolvimento dessa indústria, inclusive na região norte, especificadamente o estado do Pará, por possuir maior número de empresas do setor cerâmica vermelha da região (BETINI, 2007).

2.2.1 – Processo de fabricação da cerâmica vermelha

O processo é similar na maioria das indústrias do Brasil. O ambiente do processo de fabricação é constituído por um caixão alimentador, com destorroador seguido de um misturador, laminador, extrusão através da maromba e na sequência a cortadeira e posteriormente saindo para a queima de acordo com a Figura 2.1.

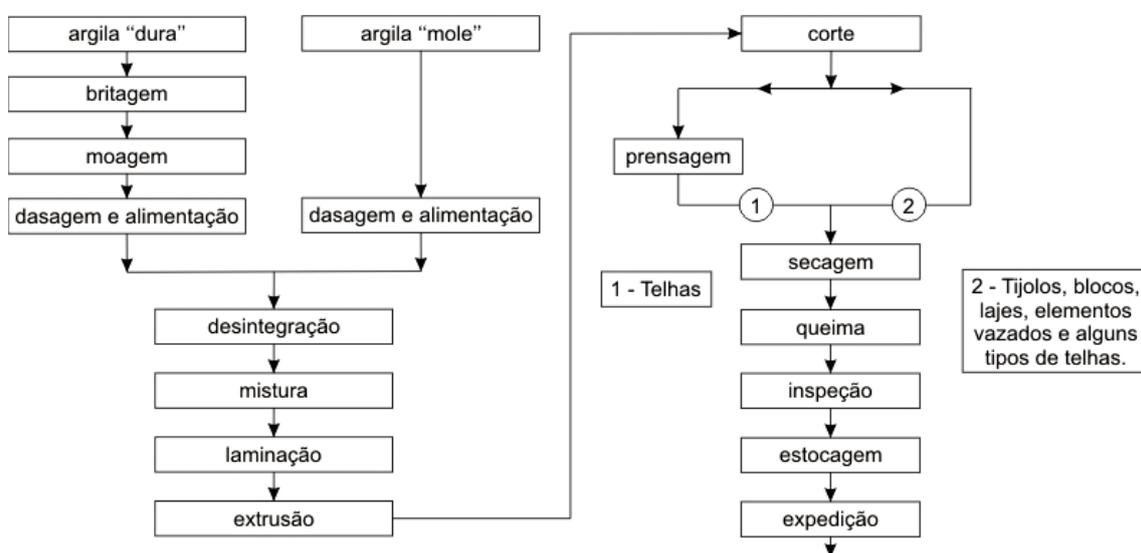


Figura 2.1 – Fluxograma do processo de produção da cerâmica vermelha.
Fonte: Adaptado de ABCERAM (2017).

2.2.1.1 – Preparação da massa

Essa etapa envolve moagem, dosagem e alimentação, controle de umidade, desintegração e laminação da matéria prima à mistura das argilas (SANTOS, 2007).

A moagem ou britagem vem após a extração, com o objetivo de reduzir a granulometria e aumentar a área superficial da argila, transformando-a em pó. Para esta operação, são utilizados os moinhos de martelos e moinhos perpendiculares. O material moído apresenta 5% do teor de umidade proveniente da água que acompanha as argilas a partir da extração (FEITOSA, 2015).

Na etapa de dosagem consiste em abastecer o processo com as matérias primas, respeitando suas proporções, que é basicamente feito por volume de material ou por peso, com maior precisão (MÁS, 2002).

A laminação é a última etapa antes da máquina extrusora (maromba), e tem por finalidade garantir que somente partículas menores (em torno de três milímetros) adentrem a máquina (GOMES, 2010). A extrusora é o equipamento onde são instalados os moldes que darão o formato da peça cerâmica.

2.2.1.2 – Conformação

A etapa do processo que dá forma à peça é denominada de conformação. A conformação, de produtos de cerâmica vermelha para a construção civil como tijolos, blocos cerâmicos e telhas, pode ser realizada por dois tipos de técnicas: por extrusão e prensagem (MAIA, 2012).

Por extrusão

A extrusão é um processo de conformação muito utilizado para obtenção de materiais cerâmicos e sua aplicação permite sua aplicação de qualquer tipo de matéria-prima com plasticidade natural ou adquirida pelo emprego de aditivos plastificantes (VICENZI, 1999). Consiste na passagem forçada de uma massa cerâmica plástica por uma boquilha ou saída com determinado formato (RIBEIRO et. al, 2003).

São três sistemas diferentes por extrusão:

- Pistão: caracteriza-se por grande uniformidade de velocidade e pressão em toda seção de saída, porém seu fluxo não é contínuo, impossibilitando a utilização de vácuo;
- Cilindros: apresenta diferenças de velocidade e pressão na seção de saída e ainda não permite uma boa homogeneização da mistura, apesar de conter fluxo contínuo de alimentação podendo com isso utilizar o sistema de desaeração (vácuo);
- Hélice: esse sistema permite uma boa homogeneização, utilização e sistema de vácuo, fluxo contínuo e boa distribuição de pressão na saída do material. Na saída da extrusora, a massa moldada é expelida de forma contínua e seccionada no comprimento desejado.

A partir de ajustes de pressão de ar e controle de umidade, o mecanismo de extrusão possibilita a obtenção de peças mais densas, delgadas e de maior resistência

verde. Com a simples troca de boquilha na finalização do eixo da extrusão, permite-se a conformação de peças e formatos de dimensões variados.

Por prensagem

A prensagem é uma conformação baseada na compactação de um pó granulado (massa) contido no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, através da aplicação de pressão (MAIA, 2012).

A operação compreende três etapas: (1) preenchimento da cavidade do molde; (2) compactação da massa e (3) extração da peça. As principais vantagens estão relacionadas a sua alta produtividade e precisão dimensional (PUREZA, 2004).

2.2.1.3 – Corte

O corte proporciona a padronização da peça a ser seguida de acordo com o modelo que está sendo processado e podem ser automáticos e manuais.

Os cortes automáticos são utilizados de três maneiras como: corte vertical rápido, corte horizontal rápido e corte oblíquo que, acoplados à velocidade com que sai a barra de massa (LOYOLA, 1998).

O corte manual a massa se movimenta, saindo do bocal direcionado por rolos geralmente de plásticos duros ou em madeira envolvida de feltro, para evitar a aderência da massa (LOYOLA, 1998). Os fios que são esticados sobre um aro móvel e regularmente espaçados ao longo dos elementos de modo a dimensionar, podem cortar transversalmente o bloco de massa, passando entre os roletes.

2.2.1.4 – Secagem e queima

A secagem tem por objetivo eliminar a água utilizada na etapa de conformação, necessária para a obtenção de uma massa plástica (VIEIRA *et al.*, 2003). Essa etapa deve ser bem conduzida a fim de garantir qualidade tecnológica nos produtos cerâmicos.

A secagem pode ser feita em galpão ou estufa, sendo a secagem em galpão mais utilizada pelas olarias. As perdas durante o processo de secagem giram em torno de 5%. Após a secagem, o produto deve ter resistência suficiente para possibilitar a manipulação que o acabamento e o transporte até a queima do corpo cerâmico exigem (SILVA *et al.*, 2011).

Argilas muito plásticas requerem muita água para sua conformação, implicando em uma retração de secagem elevada. A secagem deve ser feita de maneira lenta e controlada para que não ocorram defeitos (TUBINO e BORBA, 2006).

Existem vários processos de secagem de produtos cerâmicos, são eles:

- Secagem natural ou ao ar livre: utiliza-se o ar do meio ambiente para realizar a secagem, os secadores são barracões com proteção contra chuva. O tempo de secagem depende do clima da região e esta secagem é muito utilizada para peças de grande volume, cuja remoção de água é difícil (SOARES e NASCIMENTO, 2007);
- Secadores de forno: o ar quente procedente do forno produz um movimento contínuo na massa de ar do secador, que, no contato com os tijolos arrasta consigo a umidade. A parte mais alta do telhado tem aberturas de ventilação, por onde escapa o ar úmido (LOYOLA, 1998). Em alguns casos, se aproveita também o calor procedente da zona de resfriamento do forno, permitindo assim um trabalho contínuo, mesmo em locais onde o inverno é muito intenso (SOARES e NASCIMENTO, 2007);
- Secagem artificial: Baseia-se na absorção da água, em forma de vapor, pelo ar aquecido. Para que a secagem tenha continuidade é necessário eliminar seguidamente o ar carregado de umidade (SANTOS, 2007). Entretanto, nos secadores artificiais, onde a quantidade de vapor é muito maior, faz-se necessário a ventilação artificial através de chaminés ou ventiladores que produzem uma corrente regulável de ar (LOYOLA, 1998);
- Secador de câmara: são certo números de câmaras, dispostas uma ao lado da outra, nas quais os produtos colocados se submetem em todo volume da câmara às mesmas variações de temperatura e umidade. É conveniente que as câmaras recém-carregadas sejam alimentadas com ar quente úmido aspirado das câmaras em final de secagem e não com ar seco quente (AMARAL, 2016).
- Secador de túnel: Tem a forma de um túnel longo, preenchido com vagonetes, os quais deslizam sobre trilhos, ajustados uns aos outros, sem espaço livre. A entrada e a saída dos vagonetes se efetuam através de portas de carga e descarga situadas nas extremidades, o que tem como objetivo diminuir as perdas de calor.

Após a secagem o corpo cerâmico é queimado a temperaturas variadas que depende da composição das matérias-primas e das propriedades desejadas no produto final (PREDASSINI, 2001).

A queima tem por objetivo a ocorrência das reações químicas e físicas aos componentes da massa, a fim de adquirir ao corpo cerâmico as propriedades necessárias à sua utilização (SANTOS, 2007).

Essa obtenção tem relação com as complexas transformações químicas e físicas, que ocorrem durante o processo de queima, a Tabela 2.1 apresenta um resumo dessas características. A queimas à base de argila processa-se normalmente entre 850°C a 1450°C, dependendo do teor de argilominerais existente na sua composição (SANTOS, 2007). Após esse processo adquire-se uma elevada resistência mecânica, acompanhada pela perda total de plasticidade.

Tabela 2.1 – Transformações química e física durante o processo de queima.

Temperaturas	Transformações
Até 200°C	Eliminação da água higroscópica ou residual e da água interfoliar ou zeolítica.
De 350 a 650°C	Combustão das substâncias orgânicas e dissociação dos sulfetos com liberação de CO ₂ e SO ₂ .
De 600 a 800°C	Colapso do retículo dos argilominerais com liberação da água de constituição.
De 800 a 950°C	Decomposição dos carbonatos com liberação do CO ₂ .
De 900 a 1000°C	Reações da sílica e da alumina com outros elementos, formação de silicoaluminatos complexos que conferem ao corpo cerâmico as propriedades físico mecânica características.
Acima de 1000°C	Amolecimento e fusão dos silicoaluminatos com formação de uma fase vítrea que, englobando as partículas menos fusíveis, confere ao corpo cerâmico, dureza, compactação, impermeabilidade e resistência mecânica características.

Fonte: Adaptado de PUREZA (2004).

O comportamento de diferentes argilas durante a queima define, em muitos casos, o tipo de produto a ser fabricado, suas características técnicas e as variáveis de

queima a empregar-se (temperatura máxima e duração do ciclo de queima) bem como a microestrutura do produto final (PUREZA, 2004).

2.3 - POLO CERÂMICO NO ESTADO DO PARÁ

Para FIGUEIREDO (2016), a localização das indústrias de cerâmica vermelha é determinada por dois elementos principais: a proximidade das jazidas e a proximidade dos mercados consumidores. A primeira em função do volume de matéria-prima processada e da necessidade de transporte de grande volume e peso e a segunda tendo em vista os custos de transporte. Quanto maior o grau de qualidade da argila, maior é a importância assumida por esse fator locacional. Uma empresa localizada longe da jazida somente se justifica quando essa é de qualidade excepcional.

O Pará possui o maior número de empresas do setor de cerâmica vermelha da região norte, distribuídas em aproximadamente 07 micro regiões, que são os municípios de: São Miguel do Guamá, proximidades de Belém, Abaetetuba, Santarém, Bragança, São Sebastião da Boa Vista e Marabá (BETINI e ICHIHARA, 2007).

Com aproximadamente 42 fábricas, o município de São Miguel do Guamá, localizado na região nordeste do Pará, a 144 km de Belém, é considerado o principal distrito industrial cerâmico da região norte do Brasil. É responsável por mais de 3 mil empregos diretos e fabricação mensal aproximada de 30 milhões de tijolos e 9 milhões de telhas. Tem participação em 92% na oferta da produção estadual (SEBRAE, 2008) O volume de produção é absorvido dentro do estado do Pará e uma pequena parte é distribuída ao estado vizinho, o Maranhão (ROCHA *et al.*, 2013).

A indústria da construção civil é a atividade que apresenta maior dinamismo na produção de tijolos e telhas nesse município.

2.4 – TELHAS

Em construções de casas, galpões ou outro tipo de obras o que se pode pensar na proteção contra intempéries é a cobertura, ou seja, o telhado. Há diversos tipos de telhas e suas variações, basta fazer a escolha certa.

As telhas podem ser: de fibrocimento, as cerâmicas, as de PVC, as esmaltadas (vítreas), as de concreto, as de vidro, as transparentes (de fibra de vidro), as de zinco, as shingle, as de fibra ecológica, as de PET, as de polipropileno

Dentre os produtos da cerâmica vermelha, destacam-se as de melhor importância, telhas e tijolos, pela número produzido e comercializado, representando a maioria 90% das construções de alvenaria e construções do país (AMARAL, 2016).

Telhas cerâmicas são componentes destinados a montagem de cobertura estanque de água, de aplicação descontínua ABNT 15310 (NBR, 2009).

A principal matéria-prima para a produção de telhas é a argila e a preparação da massa é feita pela mistura de dois tipos de argila: uma fraca (rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também como um material redutor de plasticidade) e outra forte (de alta plasticidade, granulometria fina e composta essencialmente de argilominerais).

No Brasil, o uso de telhas cerâmicas ocorre desde o descobrimento. Inicialmente as telhas eram conformadas manualmente com mão-de-obra escrava, onde estas as moldavam nas suas pernas (BASTOS, 2003).

O processo produtivo da telha cerâmica consiste em quatro estágios: preparação da massa, conformação das peças, secagem e queima (SOARES e NASCIMENTO, 2007), processo apresentado no item 2.2.1.

Além dos diferentes tipos de telhas, há também a diversidade de modelos que podem ser encontrados em telhas de diferentes composições, esses modelos são ideais para compor projetos arquitetônicos e dar o encaixe perfeito nos diferentes telhados (DA CRUZ, 2010).

A Figura 2.2 apresenta a telha romana, esse modelo possui o formato plano e de encaixe fácil, esse modelo de telha deve ser utilizado em telhados com a mesma forma (SERRA e ABRANTES, 1998). Elas são de baixo custo e deve ser encontrada em diversas composições.



Figura 2.2- Telha romana.
Fonte: Adaptado de ANDRADE (2009).

A telha francesa também conhecida como telha marseille é apresentada na Figura 2.3, ela é indicada para regiões com ventos fortes ou para projetos com telhado com inclinação, devido suas bordas possuírem relevos e encaixe que permite melhor acomodação e fixação entre as telhas.



Figura 2.3 – Telha francesa ou marseille.
Fonte: Adaptado de ANDRADE (2009).

A Figura 2.4 apresenta a telha portuguesa que é bastante conhecida por seu formato da metade abaloada. Esse tipo de telha é indicado para acabamentos de telhados ondulados, pois é de fácil e resistente encaixe.



Figura 2.4 – Telha portuguesa.
Fonte: Adaptado de ANDRADE (2009).

A telha plan tem formas retas e remete a estética da telhas colonial, além de ter o design simples e encaixe fácil, ela está apresentada na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Telha plan.
Fonte: Adaptado de ANDRADE (2009).

Já a telha de modelo colonial, apresentada na Figura 2.6 tem o formato côncavo, é assentada em fileiras com posições invertidas que permite melhor escoamento da água, assim desse modo ela é indicada para uso em regiões de altos índices pluviométricos.



Figura 2.6 – Telha colonial.
Fonte: Adaptado de ANDRADE (2009).

A Figura 2.7 mostra a telha termoplan que tem dupla camada e é ideal para quem busca um bom isolamento térmico e de umidade.

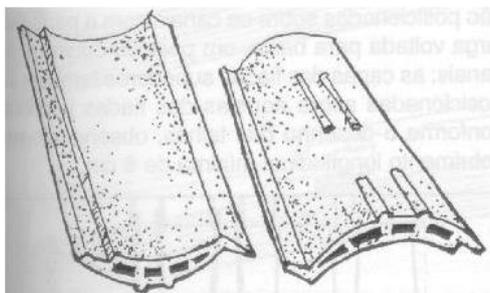


Figura 2.7 – Telha termoplan.
Fonte: Adaptado de DA CRUZ (2010).

As telhas germânicas possuem formato reto e sua instalação, Figura 2.8, se assemelha a escama de peixe.



Figura 2.8 – Telha germânica.

A ABNT 15310 (NBR, 2009) descreve que as telhas cerâmicas em conformidade apresentam parâmetros máximos e mínimos para dimensões, forma, resistência, impermeabilidade, absorção de água.

A uniformidade da cor é outra característica importante, a cor vermelha é resultado principalmente da oxidação de compostos de ferro e sua intensidade depende da quantidade do mesmo na massa, enquanto a sua uniformidade varia de acordo com a granulometria (OLIVEIRA, 2000).

2.5 – RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas 10004, resíduos sólidos são os que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição.

Os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com sua interação com o ambiente e uma dessas classificações é de acordo com sua periculosidade. Assim, a NBR 10004 de 2004, divide os resíduos em:

Resíduos classe I – Perigosos: resíduos que apresentam algum tipo de periculosidade devido à presença de alguma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

Resíduos classe II – Não perigosos: Não possuem as características de periculosidade e estão subdivididos em:

Resíduos classe II A – Não inertes: são aqueles que possuem propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Resíduos classe II B – Inertes: resíduos que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tem

nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspectos como cor, turbidez, dureza e sabor.

Caso o resíduo não esteja enquadrado nas características citadas, deve-se, realizar ensaios, visando à avaliação quanto ao seu potencial de contaminação, de acordo com as normas:

- ABNT 10005/2004 – Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado para resíduos sólidos;
- ABNT 10006/2004 – Procedimentos para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos;
- ABNT 10007/2004 – Amostragem de resíduos.

Em agosto de 2010, o Brasil instituiu a nova lei nº 12305 sobre a política nacional dos resíduos sólidos, que entre os principais pontos positivos estão a busca da redução e o reaproveitamento destes subprodutos. DIAS (2011) conclui que algumas empresas já estão fazendo uso da logística reversa, ou seja, é a volta do produto das mãos do consumidor para o estabelecimento comercial e, em seguida, para o fabricante.

2.5.1 – Resíduo siderúrgico

Atualmente, os resíduos siderúrgicos são considerados os grandes responsáveis pelas maiores agressões ao meio ambiente. Esses resíduos são basicamente a sobra da produção industrial que não pode ser descartada sem controle e exige um método específico para sua eliminação. Isto porque, uma vez que os resíduos são originados de processos industriais, sua composição é mista e, muitos deles, podem ser perigosos, trazendo consequências negativas não só para o meio ambiente, mas também para a saúde pública (GUERRA e CUNHA, 2001).

Os resíduos podem ser retornados ao processo, dependendo dos seus tipos, como fonte de energia ou como matéria-prima para a produção de aço, ou ainda comercializados como coprodutos para outras atividades industriais. O reaproveitamento destes resíduos é de grande importância para o setor devido a fatores econômicos e ambientais (VIEIRA *et al.*, 2007).

Nas classes de resíduos, os sólidos são os que apresentam maior potencial para a reutilização e reciclagem, em especial aqueles que possuem teor de ferro em sua composição (MOURÃO, 2011).

Neste grupo e os que se destacam encontram-se as escórias, lamas, poeiras/pós e carepa. A escória, proveniente dos fornos de redução e refino de siderúrgica, é composta por impurezas do minério de ferro/ferro gusa, sucatas, adições e reações ocorridas nos banhos líquidos, como os óxidos e silicatos, e constitui o resíduo de maior volume - cerca de 70% (LOBATO, 2014; IBS, 2017; IAB, 2017). Sua classificação conforme a norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004) varia entre a classe II B - não perigoso e inerte, e a classe II A - não perigoso e não inerte, considerando o teor de alumínio presente (ALMEIDA e MELO, 2001).

O INSTITUTO AÇO DO BRASIL (2017) diz que cerca de 450kg de resíduos são originados a cada tonelada de aço. Este valor está relacionado à rota tecnológica empregada e já chegou a superar a marca de 700kg (IBS, 2017). Deste montante, 80% em média são reciclados ou reutilizados em algum processo ou no ciclo do aço (IAB, 2017).

O reaproveitamento de resíduos provenientes de processos siderúrgicos no campo da cerâmica vermelha, constitui-se na atualidade uma das melhores soluções para o problema ambiental associado ao descarte de resíduo poluente (OLIVEIRA e HOLANDA, 2004).

2.5.2 – Lama de alto forno

Segundo CHIAVERINI (1986) o alto forno é o principal equipamento utilizado na metalurgia do ferro. O seu destino é produzir ferro gusa em estado líquido a uma temperatura em torno de 1500°C, com a qualidade e em quantidades necessárias para o bom andamento dos processos produtivos (MOURÃO, 2004).

A lama de alto forno é o coproduto gerado após a etapa de lavagem do gás de alto forno e a separação dos particulados sólidos da água (DIAS, 2011), ela é uma substância particulada rica em carbono. Embora sua geração corresponda somente a 4% do total dos resíduos siderúrgicos, entre os anos de 2004 a 2006 as siderúrgicas brasileiras geraram um total de 3.850.456T de lama de alto forno (IBS, 2017), de modo que o mesmo precisa ser caracterizado para orientar a sua forma de manuseio.

A Figura 2.9 apresenta o fluxograma de um sistema de limpeza de gases de alto forno e consequente obtenção da lama de alto forno.

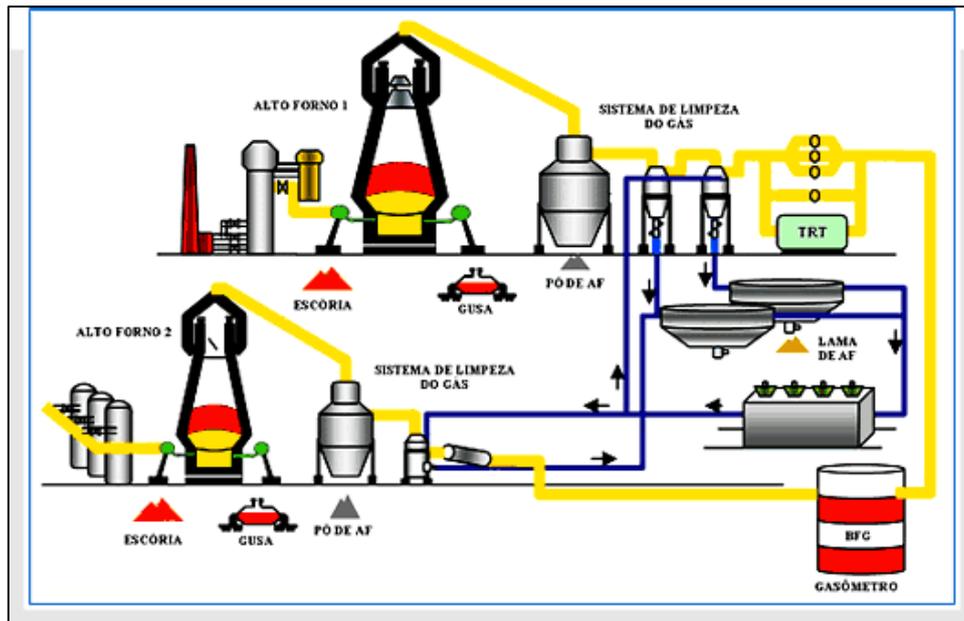


Figura 2.9 - Fluxograma do sistema de limpeza de gases de alto forno.

Fonte: Adaptado de ANDRADE (2009).

Devido a seu alto teor de carbono (cerca de 40%), a lama de alto forno proporciona um tempo de cozimento do lote de tijolo ou telha menor que o usual, portanto, contribuindo para a economia de combustível (VIEIRA *et al.*, 2007). Esse tempo cai de algo em torno de 80 horas de cozimento para aproximadamente 48 horas. Há um ganho de resistência das peças devido ao teor de minério de ferro na lama de alto forno (ARCELORMITTAL, 2017).

Para ARCELORMITTAL (2017) a presença do carbono contribui também para a uniformidade da temperatura nos fornos (equilíbrio térmico), evitando cozimento mais rápido de parte do lote ou perda de parte que não foi cozido adequadamente devido às diferenças de temperatura no forno. Contribui, portanto, para o aumento da produtividade.

2.6 – INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO EM CERÂMICA VERMELHA

Para VIEIRA *et al.* (2006), a incorporação de resíduos em cerâmica vermelha é uma solução correta do ponto de vista ambiental para disposição em larga escala de resíduo sólidos. As variações naturais das características das argilas e o emprego de técnicas de processamento relativamente simples para fabricação de cerâmica vermelhas como, blocos e telhas facilitam a incorporação de outros tipos de materiais

(SANTOS et al., 2016). Alguns resíduos facilitam o processo e melhoram a qualidade do produto final e segundo DIAS (2011) as vantagens podem ser no processo produtivo, como a melhoria da plasticidade e redução do consumo de combustível na etapa de queima promovendo, principalmente, a economia na utilização da matéria-prima e do combustível.

Os resíduos industriais têm de uma vasta variabilidade e os que são utilizados na cerâmica vermelha, em geral, são: resíduos de mineração, indústria de papel, estação de tratamentos de água e esgoto, petrolíferos, siderúrgicos, entre outros. (DIAS, 2011). VIEIRA e MONTEIRO (2009), classificam o resíduo siderúrgico não somente na natureza do resíduo, mas também no seu processamento e nas propriedades dos produtos cerâmicos e podem ser classificados como:

- Combustíveis – São aqueles que contêm uma concentração razoável de carbono, onde podem promover uma contribuição energética durante a queima das peças cerâmicas;
- Resíduos Fundentes – São resíduos que possuem componentes como metais alcalinos e alcalinos terrosos que auxiliam a formação de fase líquida durante a queima da cerâmica;
- Resíduos que afetam as propriedades das cerâmicas – São materiais que modificam o comportamento da cerâmica, e que não podem ser inseridos nas duas categorias anteriores.

Serão abordados os estudos de incorporação de resíduos em cerâmica vermelha da região sudeste do país, elaborados por MORAIS e colaboradores (2016), SANTOS JUNIOR e colaboradores (2005), OLIVEIRA e HOLANDA (2008), CAMARA (2010), CAMPELO (2010), VIEIRA e colaboradores (2006), SANTOS *et. al* (2016), FEITOSA e colaboradores (2016), esses dois últimos da região norte do país. O objetivo é verificar o comportamento de algumas propriedades tecnológicas das cerâmicas incorporada com resíduos.

MORAIS e colaboradores (2016) estudaram o efeito da adição de resíduos de lâmpadas fluorescentes usadas em cerâmicas para produção de bloco estruturais e telhas em escala industrial e concluíram que a adição de até 30% em peso melhora as propriedades das cerâmicas. Os autores concluíram também, que a adição desse tipo de resíduo diminuiu a absorção de água e aumentou a resistência mecânica, podendo contribuir para melhorar o processamento das peças.

Estudos realizados com escória de aciaria mostraram que é possível a reciclagem em cerâmica vermelha, sua adição de até 10% em peso e em temperaturas inferiores à 900°C para não ocorrer o incremento da porosidade e redução da resistência mecânica (SANTOS JUNIOR, *et al.*, 2005).

OLIVEIRA e HOLANDA (2008) utilizaram lodo de estação de tratamento de água (ETA) em cerâmica vermelha e verificaram que a adição de até 15% em peso do resíduo não causa variações significativas na generalidade das propriedades tecnológicas da massa cerâmica padrão. A microestrutura das peças de cerâmica vermelha também não foi influenciada com a incorporação do resíduo.

Com adição de finos brita é favorável para a produção de cerâmica vermelha, possibilitando redução da retração linear e da absorção de água, sem muito efeito na resistência mecânica (CAMARA *et al.*, 2010).

CAMPELO e colaboradores (2006) relatam que é possível realizar a utilização de resíduos do tipo chamote, em até 5% em massa, se as amostras forem queimadas em temperatura mínimas de 950°C. Porém, como a temperatura de queima típica para a fabricação de telhas na cerâmica em estudo é de 850°C, recomendou-se, então, a utilização de apenas 3% de adição de resíduo, à massa cerâmica.

Já na adição de resíduos oleosos, proveniente do setor petrolífero, contribuiu para redução da porosidade e, conseqüentemente, melhoria na qualidade da cerâmica. Isto foi atribuído ao poder calorífico do resíduo que contribuiu para efetivar as reações de sinterização (VIEIRA e MONTEIRO, 2006).

SANTOS *et. al* (2016) adicionaram 3, 5, 7 e 10% em peso em uma massa argilosa e os resultados foram favoráveis no índice de plasticidade e ficando dentro das zonas de extrusão aceitável e ótima.

FEITOSA e colaboradores (2016) estudaram a escória do forno panela e concluíram que a sua adição de até 10% em peso na massa argilosa ficou dentro da zona de extrusão aceitável atendendo assim os padrões exigidos por norma.

2.7 – INCORPORAÇÃO DE LAMA DE ALTO FORNO EM CERÂMICA VERMELHA

O uso da lama de alto forno incorporada à cerâmica vermelha apresenta-se como uma solução positiva para a indústria siderúrgica e cerâmica vermelha, o que já ocorre em várias unidades produtoras.

DIAS (2011) mostra ser economicamente viável a incorporação da lama de alto forno em massa cerâmica vermelha devido à redução significativa do gasto energético durante a etapa de queima da cerâmica.

Segundo VIEIRA *et al.* (2007), relatam que a lama de alto forno incorporada em até 5% em peso na massa argilosa contribuiu para aumentar a absorção de água, reduzir a tensão de ruptura à flexão e aumentar a retração linear da cerâmica queimada. Este comportamento se dá devido a composição mineralógica do resíduo.

A coloração dos tijolos e telhas, com a adição da lama de alto forno na cerâmica vermelha, se dá devido à quantidade existente ao óxido de ferro no resíduo, e que pode contribuir no ganho energético de até 50% no processo (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

VIEIRA e colaboradores (2007) verificaram que a granulometria deste resíduo é favorável à incorporação em cerâmica vermelha, porém é sugerida a adição de até 5% em peso para minimizar os efeitos deletérios nas propriedades físicas e mecânicas da cerâmica.

Sobre a utilização de lama de alto forno em cerâmica vermelha, DIAS (2011) também realizou um estudo experimental no intuito de avaliar a reciclagem da lama de alto forno em cerâmica vermelha. Foi utilizado as porcentagens de 0; 2,5; 5; 7,5 e 10% de adição do resíduo em massa argilosa, nas queimas de 750, 950 e 1050°C.

O autor apresentou, em seu estudo, os seguintes resultados:

- Nas peças queimadas a 750 e 900°C observa-se um redução da resistência mecânica até a concentração de 5% de lama de alto forno, após essa concentração, os valores ficam praticamente constante. Já para os corpos queimados na temperatura 1050°C a sinterização é mais eficiente, porém o efeito da incorporação do resíduo em concentração maior que 2,5% promove redução da resistência mecânica continuamente.
- O resíduo incorporado na massa argilosa até a quantidade de 5% em peso praticamente não alterou as propriedades físicas e mecânicas, absorção de água e resistência à compressão, dos blocos cerâmicos.
- O resíduo apresenta granulometria apropriada para sua utilização em cerâmica vermelha e não altera significativamente a plasticidade das argilas nas concentrações estudadas, porém com a adição de 10% a argila fica muito próxima de atingir a região de extrusão aceitável.

Os estudos apresentados mostram que é viável a incorporação da lama de alto forno em cerâmica vermelha. Com isso, do ponto de vista ambiental é uma das soluções corretas para o descarte do resíduo.

Portanto, conclui-se que os trabalhos, em geral, foram realizados com incorporação de resíduos a fim de encontrar possibilidades de melhoria nas propriedades tecnológicas das peças. Percebe-se também que a literatura dispõe de poucas informações a respeito de estudos realizados com a incorporação de lama de alto forno no estado do Pará.

CAPITULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – MATERIAIS UTILIZADOS

Neste trabalho, foram utilizadas argilas forte e fraca provenientes da Cerâmica Menegalli, empresa localizada no município de São Miguel do Guamá-PA (nordeste paraense), que tem a produção voltada para fabricação de tijolos e telhas.

As nomenclaturas utilizadas para identificar os materiais e suas composições são: argila forte (AFO); argila fraca (AFR); argila forte e fraca (AFOAFR); lama de alto forno (LAF); argila forte e fraca com 5% de lama de alto forno (AFOAFR5LAF) e argila forte e fraca com 10% de lama de alto forno (AFOAFR10LAF). A Figura 3.1 apresenta o local de armazenamento e da coleta das argilas forte e fraca no galpão da empresa Cerâmica Menegalli.



Figura 3.1- Local de armazenamento das argilas utilizadas.

A lama de alto forno, foi cedida por uma siderúrgica localizada no sudeste paraense e está apresentada na Figura 3.2.



Figura 3.2- Lama de alto forno cedida pela siderúrgica.

Após a coleta, a matéria-prima e o resíduo foram encaminhadas ao Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos - LASIMAC da Universidade Federal do Pará – UFPA.

3.2 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Foi realizada a caracterização química, física e mineralógica da matéria-prima e do resíduo. A Figura 3.3 mostra a representação esquemática das etapas utilizadas neste trabalho.

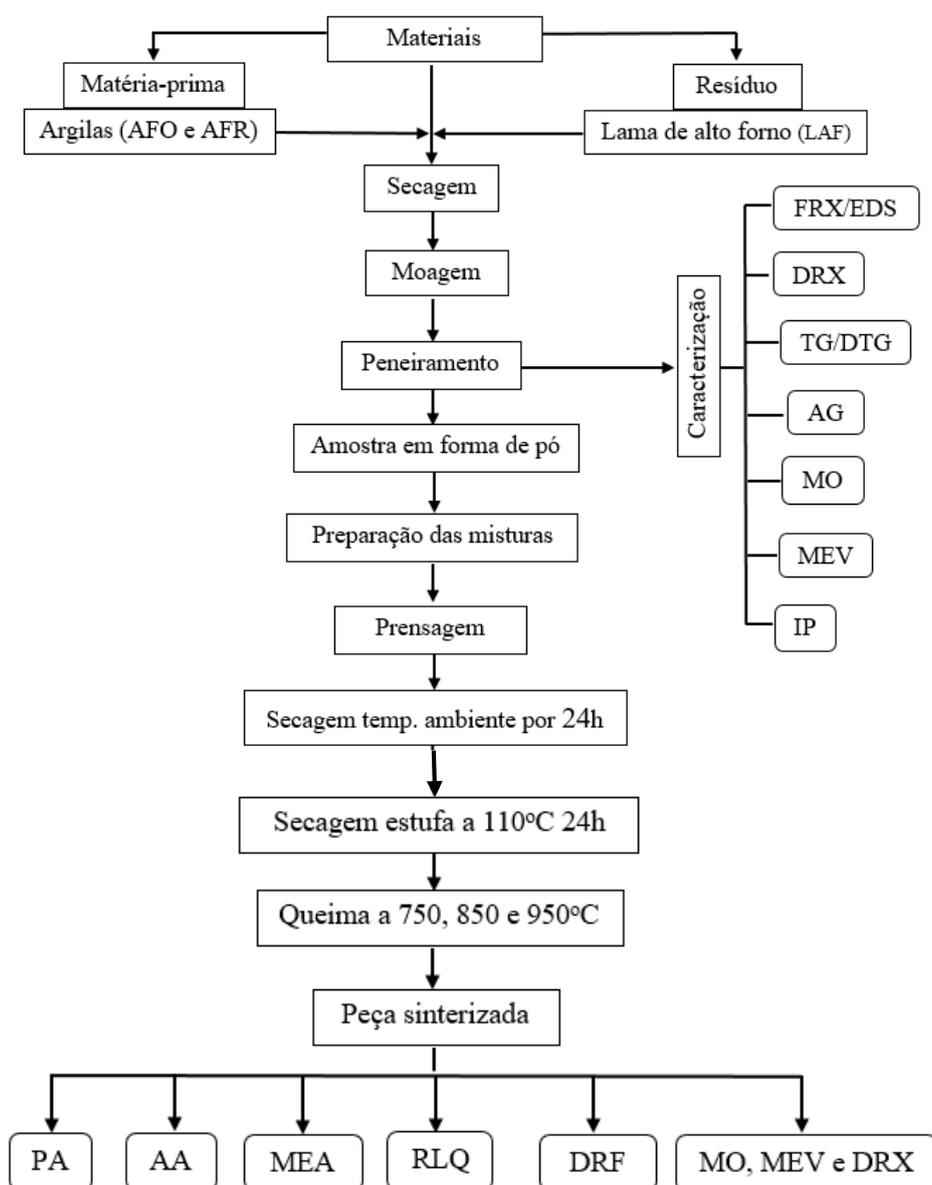


Figura 3.3 - Fluxograma experimental utilizado.

3.2.1 – Beneficiamento dos materiais

Em laboratório os materiais foram submetidos a secagem em estufas a 110°C por 24 horas e, em sequência, foram desagregados em um moinho de jarro em cerâmica sinterizada sobre rolos motorizados da marca Marconi modelo MA 500/CFT e, após essa etapa, os materiais foram peneirados em peneira de 325 *mesh*.

3.2.2 – Caracterização dos materiais

Para a verificação dos teores de óxidos constituintes nas amostras a caracterização química foi realizada por meio de fluorescência de raios-x (FRX) e por espectrometria de raios-x (EDS). Para identificação das fases cristalinas a caracterização mineralógica foi realizada por meio de análise de difração de raios-x (DRX). A morfológica foi efetuada por microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV); análise termogravimétrica (TG), para verificar a mudança de massa do material e análise térmica diferencial (DTG) e a caracterização física foi obtida pela determinação da distribuição de partículas.

3.2.2.1 – Análise química

A identificação dos componentes químicos presentes no resíduo foram realizados em espectrofotômetro de fluorescência de raios-x, utilizando o equipamento Axios Minerals da PANalytical do laboratório de Geociências da UFPA.

Já as identificações das argilas foram realizadas em espectrometria de raios-x (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 difração de raios-x das argilas foi realizado no Laboratório de Eco compósitos da Engenharia Mecânica da UFPA, onde o ensaio se deu em amostras na forma de pó compactado utilizando o difratômetro da marca Bruker, modelo D2- Phaser, operando a

30 kV e 10 mA e com um comprimento de onda $\lambda_{CuK\alpha} = 1,5406\text{\AA}$. As amostras foram examinadas em um intervalo de 2θ entre 0 e 60° , a uma taxa de varredura de $8^\circ/\text{min}$.

Em relação a lama de alto forno o ensaio foi realizado no laboratório de ensaios minerais raios-x do Instituto de Geociências da UFPA, onde a amostra também se deu em forma de pó utilizando o difratômetro de Raios-X Empyrean, da marca PANalytical, com Goniômetro $\theta - \theta$ e com tubo de raios-x cerâmico de anodo de Co ($K\alpha_1 = 1,78901\text{\AA}$), foco fino longo de 1800W e filtro $k\beta$ de Fe. O detector utilizado é de área, do tipo PIXel3D 2 x 2, com digitalizando em modo linear (1D), comprimento ativo $3,3473^\circ 2\theta$, número de canais ativos = 255.

3.2.2.3 - Análises Térmicas (TG/DTG)

Para a realização das análises térmicas das argilas e da lama de alto forno utilizou-se o analisador térmico simultâneo modelo STA 449 F3 da NETZSCH, com taxa de aquecimento $10^\circ\text{C}/\text{min}$, utilizando cadinho de aço. As análises foram realizadas no Laboratório de Física Experimental e Computacional da UFPA.

3.2.2.4 – Distribuição e tamanho das partículas

A distribuição de tamanho de partículas foi realizada pelo método combinado de sedimentação e peneiramento, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016). O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil – LEC da UFPA.

A aparelhagem utilizada na execução do ensaio foram: estufa, para manter a temperatura entre 105 e 110°C ; balança (precisão $0,1\text{g}$); dessecadores para manter o material sem variação de umidade; aparelho de dispersão; proveta de vidro de 1000ml ; densímetro de bulbo calibrado; termômetro graduado; cronometro; béquer de vidro; jogo de peneiras ($1,2$; $0,6$; $0,42$; $0,25$; $0,15$ e $0,075\text{mm}$); escovas com cerdas metálicas e agitador mecânico de peneiras.

O procedimento consiste na classificação do tamanho das partículas que ficam retidas na peneira de $10\ mesh$ (2mm), por meio de um conjunto de peneiras (peneiramento grosso). As partículas com diâmetro menor que 2mm , que passam na peneira de $10\ mesh$, são classificadas através de uma combinação de peneiramento usando peneiras de 20 , 40 , 60 , 100 e $200\ mesh$ (peneiramento fino) e sedimentação.

A técnica de sedimentação é realizada com a dispersão de 70g da amostra em 125ml de água destilada com adição de 5,71g de hexametáfosfato de sódio e 1g de carbonato de sódio, agitar até o material ficar submerso e deixar em repouso, no mínimo por 12h. A solução é agitada durante 15 minutos por um dispersor e colocada em tubos de ensaio de 1.000ml. O diâmetro esférico equivalente das partículas da amostra é calculado através da lei de Stokes, representado na Eq. (3.1), na qual a velocidade terminal de sedimentação depende do tamanho de partícula e da viscosidade do fluido.

A determinação dessa velocidade foi definida por:

$$V = gd^2 \frac{(\rho - \rho_f)}{18\eta} \quad (3.1)$$

Sendo:

V = velocidade terminal;

g = gravidade;

d = diâmetro esférico equivalente;

ρ = massa específica do material;

ρ_f = massa específica do fluido; e,

η = viscosidade do meio fluido.

3.2.2.5 - Microscopia ótica (MO)

A morfologia das partículas das argilas e do resíduo foram realizadas no Laboratório de microscopia ótica e de varredura da Engenharia Química da UFPA por microscopia ótica (MO) modelo: Eclipse LV 150/150A da Nikon e posteriormente fotografadas.

3.2.2.6 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura das argilas e da lama de alto forno foram realizadas no Laboratório de Microscopia ótica e de varredura da Engenharia Química da UFPA, utilizando um microscópio eletrônico de varredura de bancada Hitachi PAnalytical TableTop SEM TM3030.

3.2.3 – Preparação das composições

A preparação das composições da matéria-prima e o resíduo foram secas na estufa de modelo DIMATE à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ a 110°C por 24 horas.

Foram preparadas formulações utilizando uma massa argilosa sem adição de resíduo e com incorporações de 5 e 10% em massa de lama de alto forno. As formulações foram homogeneizadas e umedecidas com 8% em peso de água, posteriormente colocadas em um moinho de bolas da marca WORK INDEX, Série 005, por 30 min. e, em seguida, passadas na peneira de 35 *mesh*.

A Tabela 3.1 apresenta a composição das formulações da massa cerâmica com a incorporação da lama de alto forno.

Tabela 3.1 - Composição em peso dos materiais utilizados. Argila Forte (AFO), Argila Fraca (AFR) e Lama de alto forno (LAF).

Composições	Materiais em %			Quantidade de corpo de prova
	AFO	AFR	LAF	
AFOAFR	50	50	-	20
FOFR5LAF	47,5	47,5	5	20
FOFR10LAF	45	45	10	20

Foram moldados no total de 180 corpos de prova, sendo 60 para cada queima (750 , 850 e 950°C).

3.2.4 – Índice de plasticidade (IP)

O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil – LEC da UFPA para todas as formulações citadas na Tabela 3.1, onde foi avaliada a plasticidade das argilas, da lama de alto forno e composições.

O método utilizado para o ensaio de plasticidade foi realizado pela determinação dos limites de Atterberg. Este método consiste na técnica de determinação de dois limites de consistência, conhecidos como limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), cujos os procedimentos estão descritos nas normas da NBR-6459/2016 e NBR-7180/2016 respectivamente.

O índice de plasticidade (IP) é dado por pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, como pode ser representado pela Eq. (3.2).

$$IP = LL - LP \quad (3.2)$$

Sendo:

IP= índice de plasticidade;

LL= limite de liquidez;

P= limite de plasticidade.

O LP é o teor mínimo de água que pode ser adicionado a massa e que permite que essa massa seja moldada em cilindros de 3 a 4mm de diâmetro e 15 cm de comprimento. O LL é a quantidade máxima em peso de água que pode ser adicionada massa e que permite que essa massa quando separada por um sulco se una novamente após 25 golpes no aparelho Casagrande.

3.2.5 – Conformação do corpo de prova

Após a preparação da massa o material foi acondicionado em sacolas plásticas e deixado em repouso por 24 horas para assegurar a homogeneidade da umidade nas massas. Obtida as massas homogêneas, foram moldados corpos de prova em matriz de aço com 80g de massa e dimensões exigidas pela NBR 5738 (ABNT, 2015) de aproximadamente 10,0 x 5,0 x 1,0 cm. Para esta conformação utilizou-se uma prensa hidráulica manual Karl Kolb scientific technical Suplies D-6072 de fabricação alemã com uma prensagem uniaxial de 100KN.

A Figura 3.4 apresenta a matriz de conformação das massas argilosas.



Figura 3.4 - Matriz de aço utilizada na conformação das massas argilosas.

A Figura 3.5 faz uma apresentação dos corpos de prova após a sua conformação. Vale ressaltar que nesta figura encontram-se somente alguns corpos de prova

registrados devido a relevância de apenas demonstrar aqui como se apresenta o material nesta etapa de moldagem.



Figura 3.5 - Apresentação do corpo de prova já conformado.

3.2.5.1 – Secagem dos corpos de prova

Depois da etapa de conformação os corpos de prova foram colocados a temperatura ambiente por 24 horas, após foram medidos e pesados. Em seguida colocados na estufa para secagem onde permaneceram por mais 24 horas a uma temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Após essas etapas todos os corpos de prova foram pesados e medidos para o cálculo da retração linear de secagem.

3.2.5.2 – Sinterização e ensaio dos materiais

A sinterização dos corpos de prova foi realizada nas temperaturas de 750, 850 e 950°C em forno do tipo mufla, Linn Elektro Therm, de temperatura até 1300°C . Utilizou-se uma taxa de aquecimento constante de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e mantidos na temperatura patamar por 2 horas e resfriados por convecção natural desligando-se o forno. A Figura 3.6 (a) apresenta o forno tipo mufla utilizado na sinterização e a (b) mostra os corpos de prova após a sinterização.



(a)



(b)

Figura 3.6 - (a) forno tipo mufla e a (b) corpos de prova após a sinterização.

3.2.6 - Determinação das propriedades dos materiais cerâmicos

Após a sinterização de todos os corpos de prova, foram realizados os ensaios para se determinar as propriedades, tais como: a) porosidade aparente (%); b) absorção de água (%); c) massa específica aparente (g/cm^3); d) retração linear de queima (%); e) determinação da resistência a flexão.

As metodologias usadas para se obter tais propriedades foram baseadas nas ASTM C373-72 (1997) e ASTM C674 – 13 e na NBR15310 (ABNT, 2005).

3.2.6.1 – Porosidade aparente (PA)

Porosidade aparente é a porcentagem entre o volume dos poros abertos do corpos de prova em relação ao seu volume total. Ela estabelece a gama técnica de coedura de um produto e o respectivo grau de sinterização (GOMES, 1988).

Os corpos de prova foram pesados após imersos em água fervente por 2h, usou-se a balança digital de marca EVEN, modelo BL-320AB-BI (precisão 0,1g), foi colocado à balança um aparato de madeira conjuntamente com uma haste feita de aço servindo como suporte para a pesagem do corpo de prova que fica imerso em água, este para verificação de porosidade aparente.

A medida da porosidade aparente foi determinada através da Eq. (3.3):

$$PA(\%) = \frac{M_u - M_s}{(M_u - M_i)} \times 100 \quad (3.3)$$

Sendo:

M_u = massa úmida (em g);

M_s = massa seca (em g);

M_i = massa imersa (em g).

3.2.6.2 – Absorção de água (AA)

A absorção de água está relacionada com a quantidade de água em porcentagem que o corpo absorve após a queima. Os corpos de prova foram completamente imersos em água fervente por 2h e posteriormente pesados em balança digital de marca EVEN, modelo BL-320AB-BI (precisão 0,1g).

A medida da absorção de água foi efetuada através da Eq. (3.4):

$$AA (\%) = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \times 100 \quad (3.4)$$

Sendo:

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

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

3.2.6.3 – Massa específica aparente (MEA)

A massa específica aparente é a razão entre o peso do corpo de prova após a queima e o seu volume total, formado pelos volume das partículas e o volume dos poros.

As medidas de altura, comprimento e largura foram obtidas com auxílio de um paquímetro digital Mitutoyo (resolução $\pm 0,01$ mm). As massas foram determinadas através da balança digital de marca EVEN, modelo BL-320AB-BI (precisão 0,1g). Conhecendo-se as medidas calcula-se a massa específica aparente de acordo com a Eq. (3.5):

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \quad (3.5)$$

Sendo:

ρ_{ap} = massa específica aparente (em g/cm³);

M = massa (em g);

V = volume dos corpos de prova queimados (em cm³)

3.2.6.4 – Retração linear de queima (RLQ)

Os corpos feitos de argila sofrem retração (redução de tamanho) após a secagem e após a queima. Essa retração é devida após à eliminação de água usada na formação dos corpos (SANTOS, 2007). O autor relata que com a eliminação da água e o surgimento de vazios deixados por ela, ocorre uma aproximação das partículas em face das forças de tração eletrostáticas, provocando um adensamento ou aglomeração. Após a queima, a retração é consequência do fenômeno de sinterização.

As dimensões das peças secas sinterizadas foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital Mitutoyo (resolução $\pm 0,01\text{mm}$). Posteriormente foi calculada a retração das peças queimadas através da Eq. (3.6):

$$\text{RLq (\%)} = \frac{L_s - L_q}{L_s} \times 100 \quad (3.6)$$

Sendo:

RLq = Retração Linear de queima;

L_s = Comprimento do corpo de prova seco;

L_q = Comprimento do corpo de prova após queima;

3.2.6.5 – Determinação da resistência à flexão (DRF)

O ensaio da resistência à flexão foi determinado de acordo com a norma ASTM D- C674 – 13, em máquina universal de ensaios de acionamento mecânico, marca Emic DL2000, com velocidade igual a 5mm/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 o módulo de ruptura à flexão calculada pela Eq. (3.7).

$$\text{MRF}_{(\text{Mpa})} = \frac{3P_R L}{2I_R h_R^2} \quad (3.7)$$

Sendo:

M_{RF} = 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).

3.2.7 – Avaliação microestrutural

A avaliação microestrutural das peças sinterizadas será realizada por MO e MEV após a seleção das amostras. A investigação das fases cristalinas formadas durante a sinterização foi realizada por difração de raios-x, através dos procedimentos citados nos itens 3.2.2.5 e 3.2.2.6.

3.2.7.1 – Microscopia ótica (MO)

As amostras obtidas foram previamente preparadas utilizando uma politriz e lixadeira metalográfica, posteriormente foi realizado um polimento, procedimentos apropriadas para superfície molhada. Na sequência as peças foram secas em estufa a 110°C por 24h e levadas para leitura no microscópio ótico.

3.2.7.2 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As amostras obtidas foram preparadas com cortes de 1x1x1cm realizados com o auxílio da uma serra de corte, para poder caber na câmara de amostras. Após o preparo as amostras foram submetidas a análise na região da fratura. Não houve a necessidade de metalizar as peças, devido ao ambiente ser de vácuo variável.

3.2.7.3 - Difração de raios-x (DRX)

A determinação das fases presentes após a sinterização foi realizada por DRX, no Laboratório da Faculdade de Física da UFPA. Após a preparação das amostras para a análise foi utilizado um difratômetro D8 Advance da Bruker, com geometria Bragg-

Brentano e detector LynxEye, fonte de radiação de Cu ($K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$), faixa angular (2θ) variando de 5 a 75° , a coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de $0,02^\circ$ e tempo por passo 0,2s (tempo total da análise 714,4s).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E DO RESÍDUO

4.1.1 - Caracterização química

4.1.1.1 - Espectrometria de raios-x das argilas e Fluorescência de raios-x da lama de alto forno

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da espectrometria de raios-x das argilas e fluorescência de raios-x da lama de alto forno.

Tabela 4.1- Composição química da AFO, AFR e LAF.
PF: perda ao fogo.

Componentes	% em peso		
	AFO	AFR	LAF
SiO ₂	59,03	66,39	2,70
Al ₂ O ₃	26,75	18,74	1,95
Fe ₂ O ₃	9,09	7,75	36,3
TiO ₂	1,80	1,63	0,21
MnO	--	0,65	0,38
MgO	--	--	0,30
CaO	--	0,97	4,99
K ₂ O	3,31	4,36	0,30
SO ₃	--	--	0,80
ZnO	--	--	0,49
Cl	--	--	0,65
PF	12,19	5,38	50,8

Nota-se que as matérias-primas são constituídas essencialmente pelos óxidos de silício (66,39% da AFR e 59,03% da AFO) e alumínio (18,74% da AFR e 26,75% da AFO), apesar desses valores serem inferiores a 38,9% a porcentagem ainda é considerada elevada e certifica a essas matérias primas, um caráter refratário (SANTOS, 1989).

As AFO e AFR são de natureza não carbonática devido ao baixo teor de óxido de cálcio (0,97% na AFR e ausente na AFO). O elevado teor de óxido de ferro Fe₂O₃ (7,75% da AFR e 9,09% AFO) confere uma coloração avermelhada ao produto após a queima, além de reduzir a refratariedade da massa. As argilas apresentam baixos teores

de óxidos fundentes (K_2O), 4,36% (AFR) e 3,31% (AFO), o que pode interferir diretamente no processo de queima. A ausência desses óxidos fundentes dificulta o processo de formação de fase líquida necessária para uma melhor densificação das cerâmicas após a sinterização (DIAS, 2011).

Sobre a perda ao fogo (PF) das AFO e AFR ocorre geralmente devido à perda de água de constituição de argilominerais e queima da matéria orgânica e decomposição de carbonatos. A elevada PF das argilas está associada a perda de água da constituição da caulinita (DIAS, 2011).

Nota-se que o resíduo, a lama de alto forno, apresenta elevados teores de óxido de ferro (36,3%) e baixos teores de sílica (2,70%) e alumina (1,95%). No que se refere ao óxido de ferro esse resultado pode contribuir para conferir à cerâmica queimada a coloração avermelhada (OLIVEIRA *et al.*, 2017). As argilas encontradas no estado do Pará, geralmente, possuem baixos teores de óxidos de ferro o que confere as peças finais uma cor mais clara. Dessa forma, a incorporação da lama pode induzir uma melhoria na cor do produto final. O elevado percentual de PF do resíduo (50,8%) está associada, sobretudo, à combustão dos finos de coque (VIEIRA *et al.*, 2007).

4.1.2 - Caracterização mineralógica

4.1.2.1 - Difractometria de raios-x das argilas e do resíduo

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os difratogramas de raios-x das argilas forte (AFO) e fraca (AFR), respectivamente.

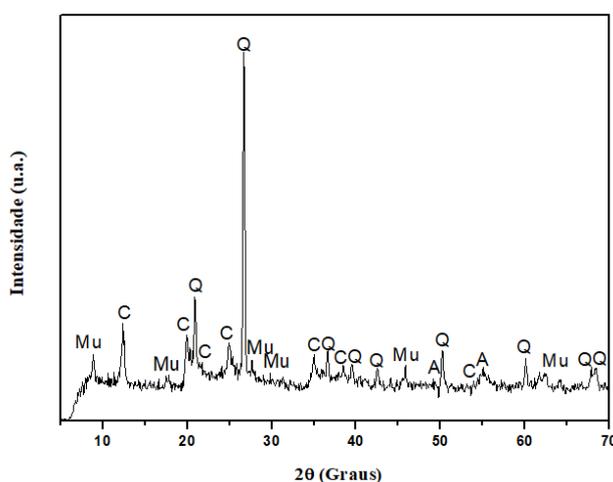


Figura 4.1 - Difratograma de raios-x da AFO. C = caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A= anatásio.

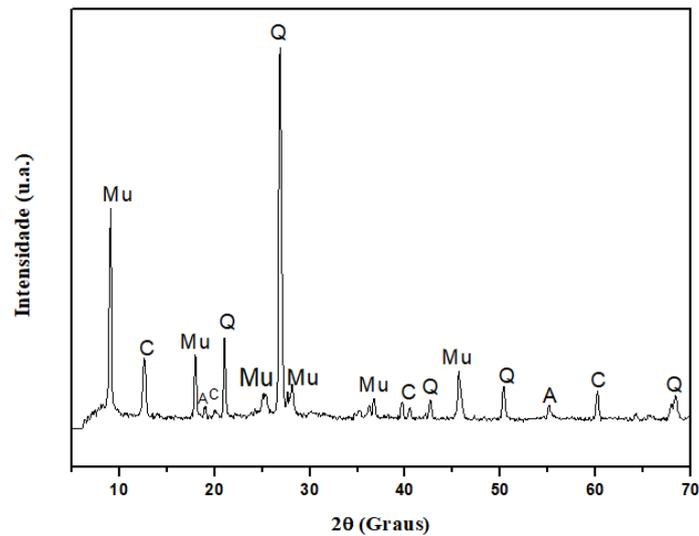


Figura 4.2 - Difratoograma de raios-x da AFR. C = caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A = anatásio.

Os resultados mostram fases cristalinas presentes como 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 e MONTEIRO, 2004). O quartzo se constitui na principal impureza presente, causa redução na plasticidade e pode gerar trincas devido às suas transformações de fase com a elevação da temperatura (SANTOS, 1989).

A mica muscovita é um mineral com textura lamelar que pode ocasionar o aparecimento de defeitos nas peças cerâmicas (VIEIRA *et al.*, 2008), porém ela pode auxiliar o processo de formação de fase vítrea, principalmente devido à presença de K₂O (óxido de potássio) em sua estrutura, a qual atua como fundente na etapa de sinterização da cerâmica vermelha (DIAS, 2011).

A análise por difração de raios-x do resíduo lama de alto forno está representada na Figura 4.3.

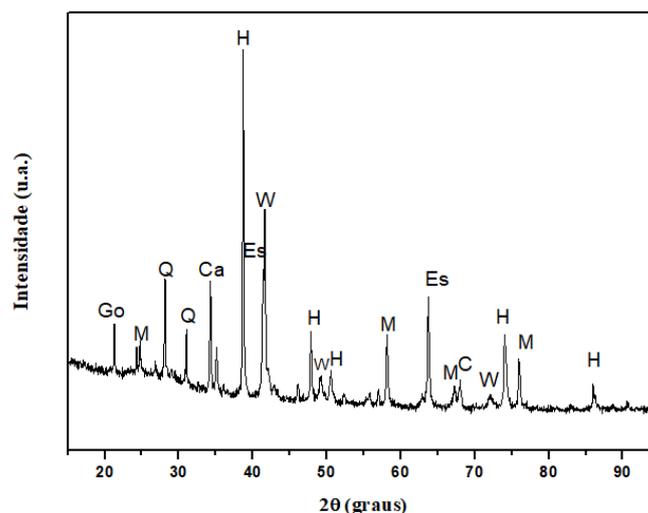


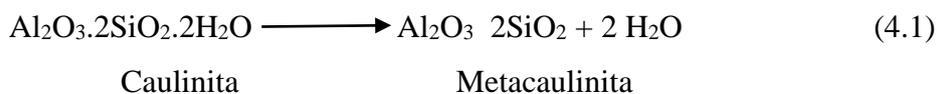
Figura 4.3 - Difratoograma de raios-x da LAF. Ca: calcita; Es: espínélios, Go: goethita; H: hematita; M: magnetita; Q: quartzo; W: wustita; C: caulinita.

A análise por difratometria de raios-x revelou a presença de fases como a hematita, magnetita e wustita que estão associadas à compostos de ferro. Além dessas fases associadas a óxidos ferro, fases como calcita e quartzo também foram observadas.

Devido à composição química complexa, vale ressaltar que podem existir outras fases cristalinas minoritárias. Outro aspecto importante que vale a pena citar é a presença de finos de coque nesse tipo de resíduo que não puderam ser identificados devido ao seu caráter amorfo.

4.1.2.2 - Termogravimetria (TG/DTG) das argilas e da lama de alto forno

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam as curvas TG/DTG das AFO, AFR e LAF, respectivamente. Nota-se que nas temperaturas iniciais há uma perda de massa associada à perda de água por adsorção. Posteriormente, entre 445 e 480°C há outra perda de massa que está atribuída a desidroxilação da caulinita, transformando-a em metacaulinita uma fase amorfa (CANDIDO, 2012). As transformações térmicas que a caulinita sofre com o aquecimento podem ser ilustrada pelas Eq. 4.1 (SANTOS, 1989).



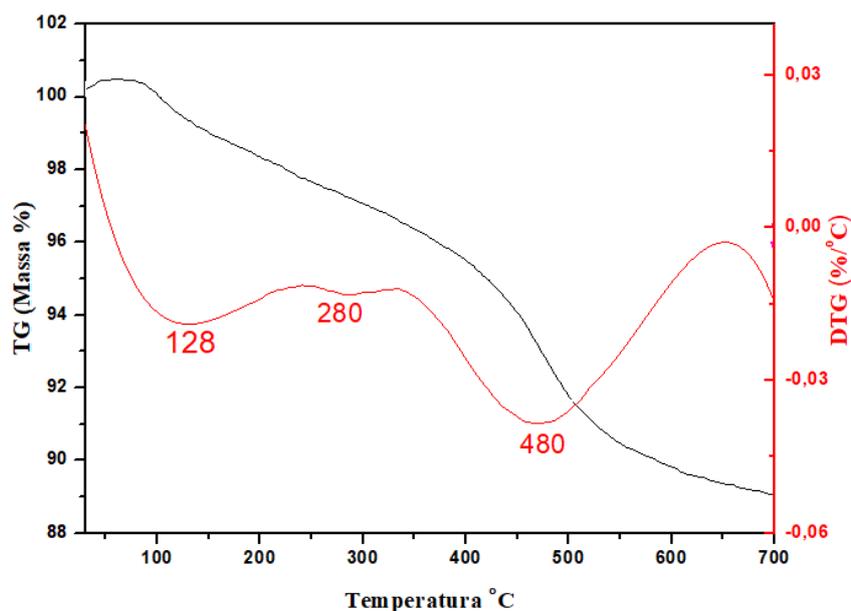


Figura 4.4 – Curvas TG/DTG da AFO.

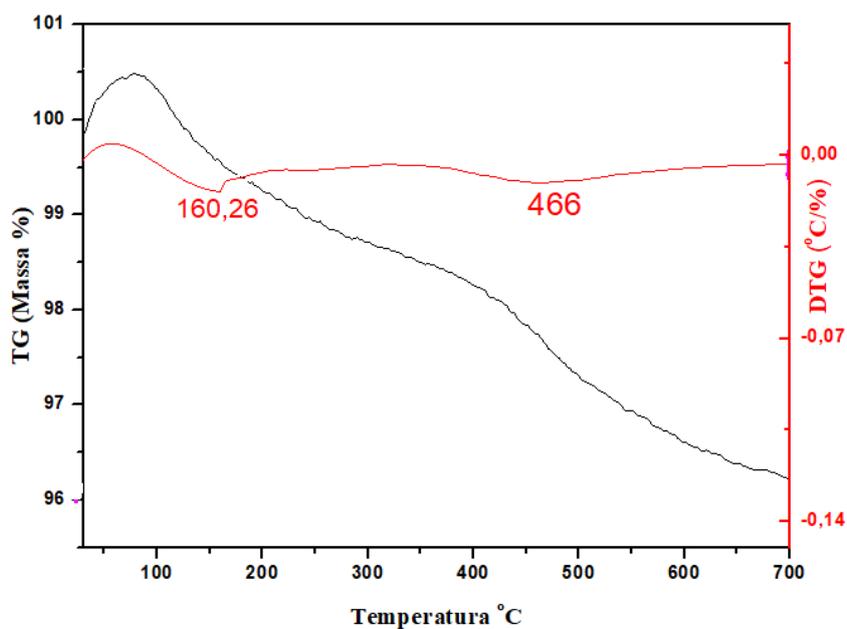


Figura 4.5 – Curvas TG/DTG da AFR.

A Figura 4.6 mostra a TG/DTG do resíduo. É possível observar uma perda de massa inicial associada à água absorvida em, aproximadamente, 126°C. Em seguida nota-se nova perda de massa entre 200 e 275°C associada à desidroxilação da goetita, identificada no DRX. Posteriormente, observa-se outra perda de massa, em aproximadamente 630°C, associada à combustão de finos de coque presente no resíduo (VIEIRA *et al.*, 2007; DIAS, 2011).

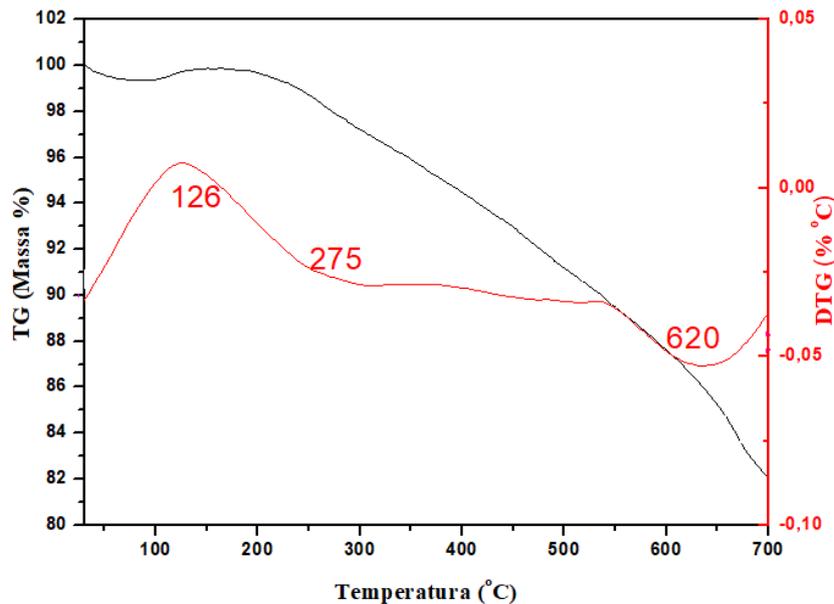


Figura 4.6 – Curvas de TG/DTG da LAF.

4.1.3- Caracterização física

4.1.3.1 - Distribuição e tamanho das partículas das argilas, da lama de alto forno e das composições

A Figura 4.7 apresenta a curva de distribuição de tamanho de partículas das argilas forte e fraca como também da lama de alto forno.

De acordo com a classificação da International Society of Soil Science a “fração argila” está associada com partículas de tamanhos inferiores a 0,002mm. Assim, nota-se que o teor fração “argila” na AFO é igual a 14,24%, para a AFR é de 7,12%. Esse percentual da AFO acima do percentual da AFR tende a fornecer maior plasticidade comparada a AFR. A fração “silte” compreende partículas de tamanhos entre 0,002mm a 0,02mm e o percentual dessa fração para a AFO é de 45,94% e para AFR é de 47,68%. A fração “areia” compreende de partículas com tamanhos superiores a 0,02mm e o percentual da AFO é de 39,82% e da AFR é de 45,20%. Esse resultado indica que a mistura entre as argilas pode favorecer o controle da plasticidade e corroborar para o controle dimensional das peças.

A LAF apresenta granulometria mais grosseira que as argilas. Cerca de 86% das partículas do resíduo apresentam tamanho entre 0,03-0,07mm, isso confere a esse material uma distribuição de partículas bastante apropriada para uso em cerâmica

vermelha (VIEIRA *et al.*, 2007). A densidade real do resíduo, medida por picnometria, é de 2,65 g/cm³.

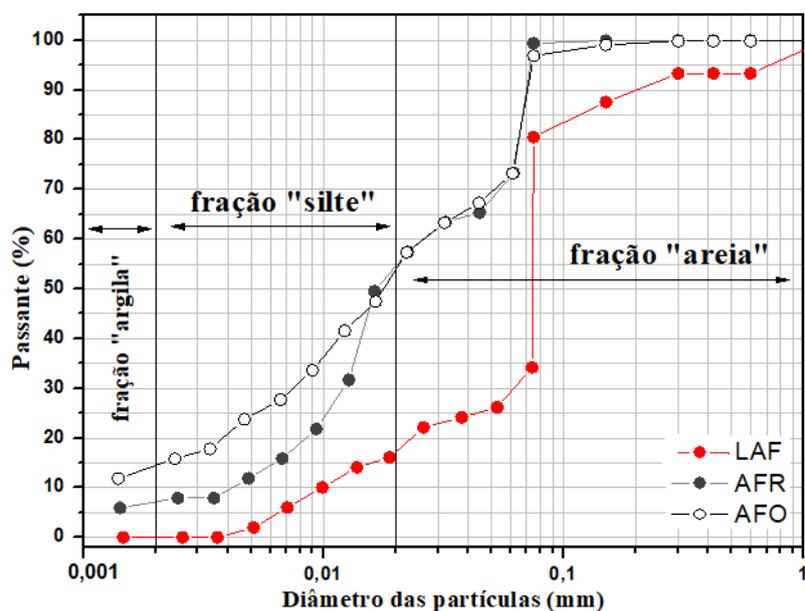


Figura 4.7 – Curva de distribuição do tamanho das partículas das AFO, AFR e LAF.

A Figura 4.8 apresenta a curva de distribuição de tamanho de partículas das composições AFOAFR, AFOAFR5LAF e AFOAFR10LAF. Nota-se que o teor fração “argila” na AFOAFR é igual a 48,33%, para a AFOAFR5LAF é de 53,33% e para a AFOAFR10LAF é de 65%.

A fração “silte” o percentual da AFOAFR é igual a 35%, para a AFOAFR5LAF é de 32,5% e para a AFOAFR10LAF é de 21,66%. A fração “areia” o percentual da AFOAFR é igual a 16,67%, para a AFOAFR5LAF é de 14,17% e para a AFOAFR10LAF é de 13,34%.

Pode-se observar que as composições apresentam uma granulometria menos grosseira que as das AFO, AFR e LAF. Isso se deu devido a introdução de materiais não plásticos, que altera a granulometria da massas (PRACIDELLI, 1997).

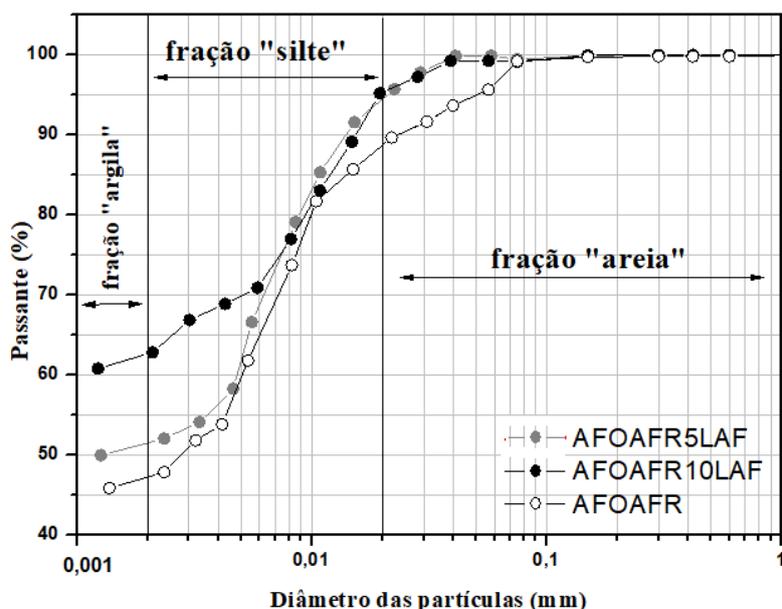


Figura 4.8 – Curva de distribuição do tamanho das partículas das composições estudadas.

A Figura 4.9 apresenta o diagrama de Winkler. Este diagrama baseia-se na granulometria das argilas para delimitar as regiões apropriadas para a fabricação de determinados produtos, como: região 1, tijolo maciço; região 2, blocos vazados; região 3, telhas; região 4, manilhas (DIAS, 2011). Observa-se que as argilas encontram-se um pouco abaixo região para produção de tijolos maciços, já a lama é localizada próximo ao maior teor de fração areia. Tal localização pode ser explicada pelo elevado teor de fração areia na lama de alto forno, cerca de 86%, sugerindo então, que esse resíduo pode contribuir para controlar a plasticidade das argilas.

No que se refere às formulações estudadas, observa-se que as composições AFOAFR e AFOAFR5LAF situam-se na região 3, indicando que essas formulações podem ser utilizadas para a fabricação das telhas. O mesmo não é observado para a composição AFOAFR10LAF localiza-se tanto fora da região 3 quanto das demais regiões.

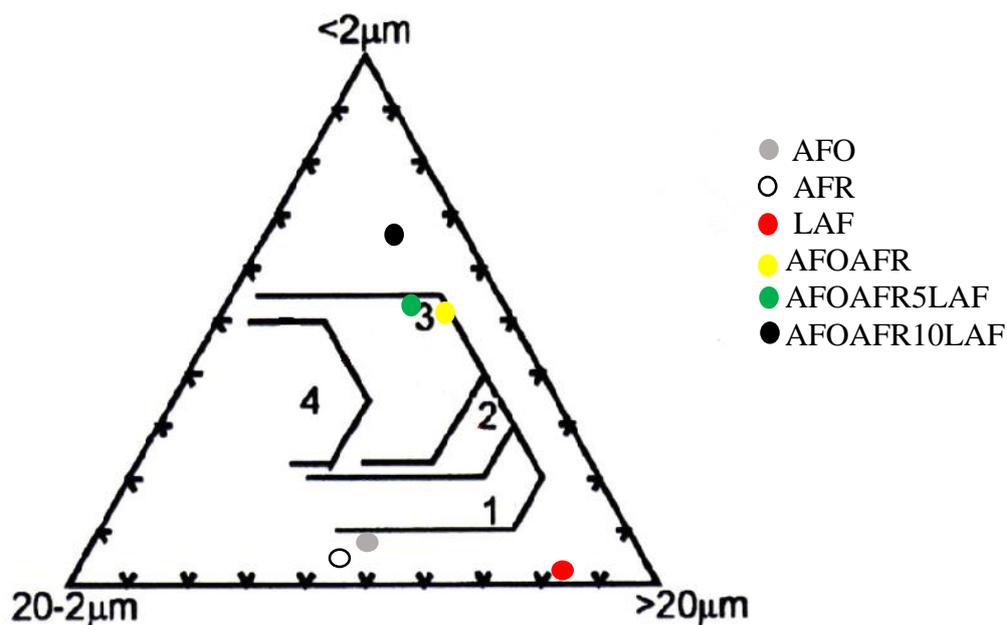


Figura 4.9 - Diagrama de Winkler para AFO, AFR, LAF e composições estudadas.

4.1.4 – Caracterização morfológica

4.1.4.1 – Microscopia ótica (MO)

A Figura 4.10 apresenta as micrografias obtidas por MO das argilas AFO, AFR e da LAF, investigadas em forma de pó. As micrografias (a) e (b) correspondem às AFO e AFR, respectivamente e a micrografia (c) corresponde às partículas da LAF.

Observa-se na AFO e AFR a presença de mineral micáceo, circulado em preto, quartzo, indicado pela seta preta, e minerais ferromagnesianos, indicados pela seta branca. A presença desses constituintes confirma os resultados apresentados no difratograma de raios-x das AFO e AFR.

Na micrografia (c) são observados aglomerados da LAF e pode-se perceber que o resíduo tem a coloração escura e homogênea confirmando a presença de compostos de ferro como observado no DRX.

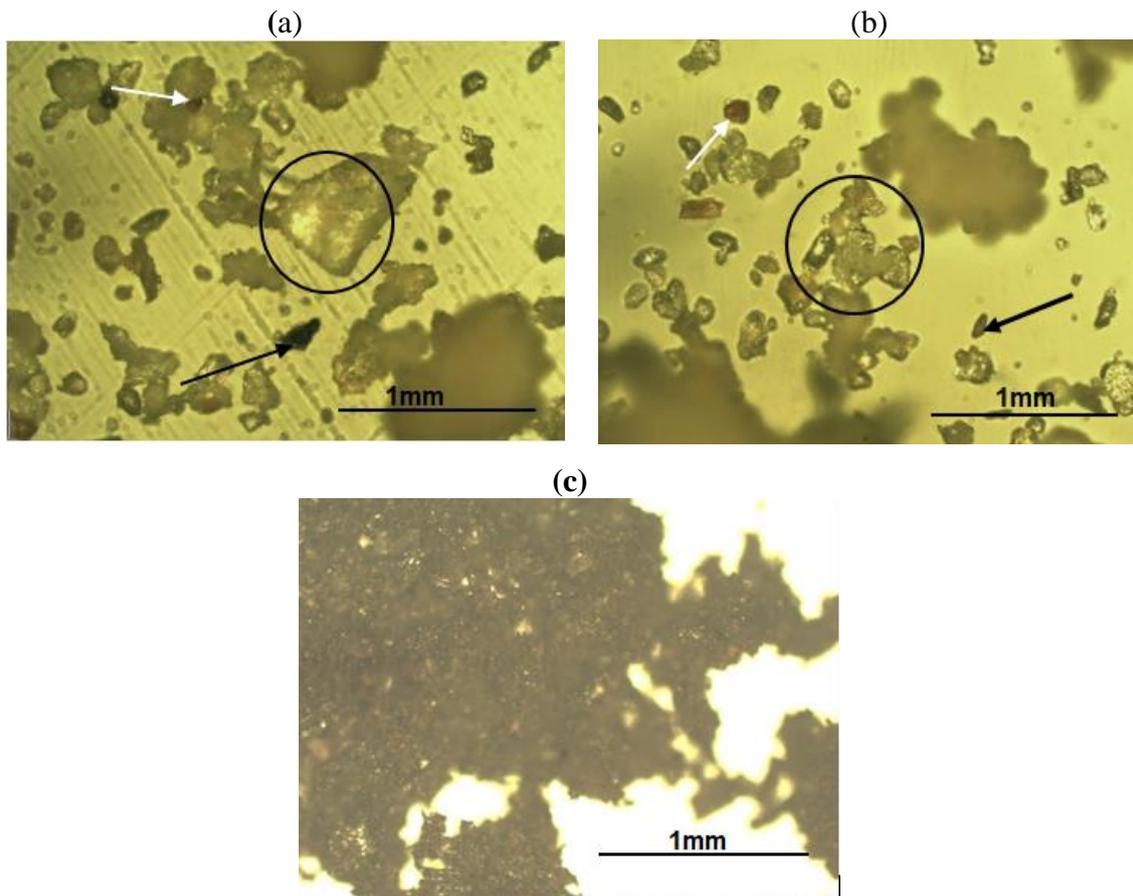


Figura 4.10 - Micrografias obtidas por MO das argilas e do resíduo: (a) AFO, (b) AFR e (c) LAF.

4.1.4.2 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Na Figura 4.11 estão apresentadas as micrografias obtidas por MEV das argilas e do resíduo. As micrografias (a) e (b) correspondem às AFO e AFR, respectivamente e a micrografia (c) corresponde às partículas da LAF. Nota-se que as AFO e AFR apresentam pequenas partículas em formas hexagonais associadas, provavelmente, a caulinita, argilomineral presente nas argilas (VIEIRA *et al.*, 2004).

Na LAF notam-se, sobretudo, partículas mais grosseiras que as argilas, confirmando os resultados obtidos por meio da distribuição de partículas. Além disso, é observada uma distribuição heterogeneidade de formas e tamanhos das partículas.

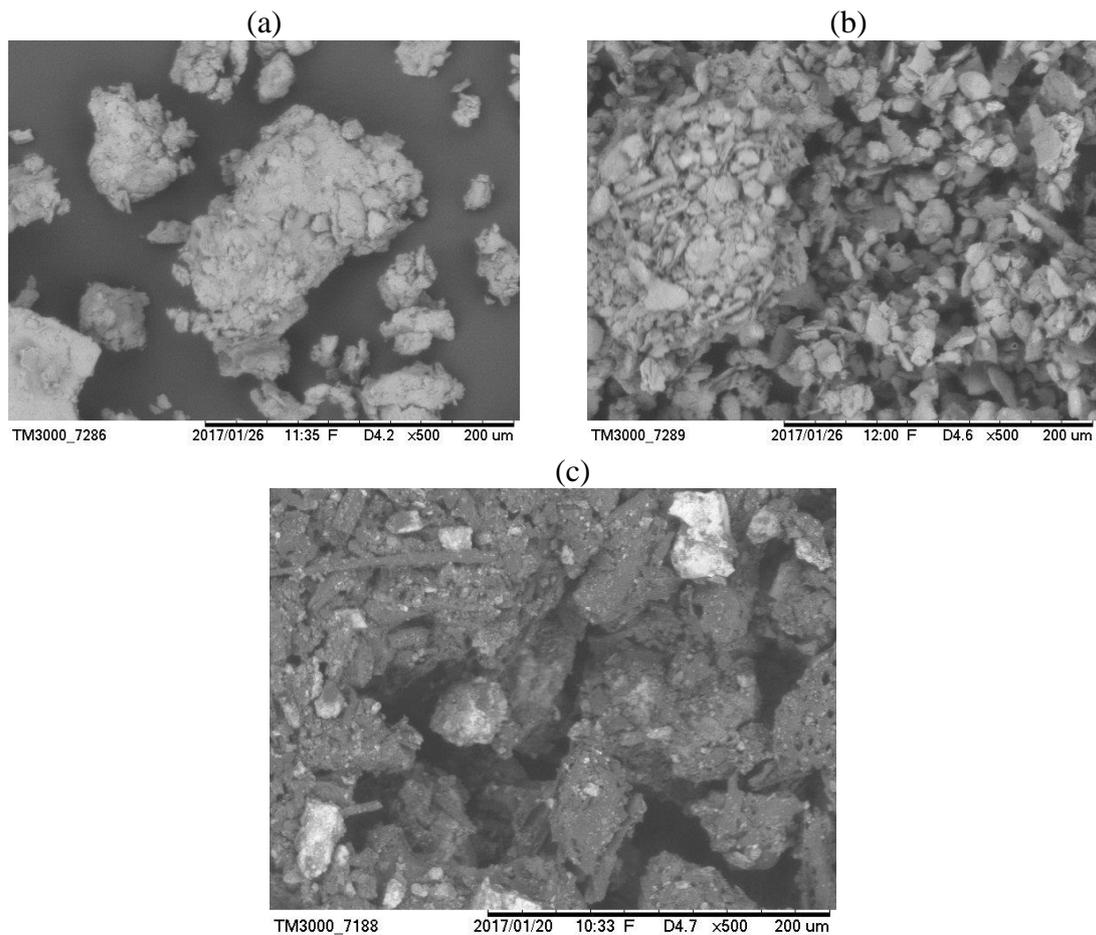


Figura 4.11 - Micrografias obtidas por MEV das argilas e do resíduo: (a) AFO, (b) AFR e (c) LAF.

4.1.5 – Propriedades físicas e mecânicas

4.1.5.1 – Plasticidade

A Figura 4.12 apresenta o prognóstico de extrusão das matérias-primas e das composições estudadas. É possível observar que as argilas forte e fraca, localizam-se fora da região de extrusão aceitável, indicando que a argila forte é de excessiva plasticidade e a fraca possui menos plasticidade, próximo ao limite de extrusão aceitável.

Ao analisar o índice de plasticidade da composição AFOAFR, nota-se que essa formulação situa-se na zona de extrusão ótima, indicando que para a produção de peças extrudadas, essa seria a composição ideal de trabalho.

A incorporação da lama de alto forno nas concentrações de 5 e 10% (AFOAFR5LAF e AFOAFR10LAF) localizam-se fora do limite aceitável indicando que a adição do resíduo provoca uma redução no índice de plasticidade.

O valor mínimo da água de conformação é importante no processo de fabricação das peças cerâmicas, pois contribui para reduzir a retração de secagem e queima favorecendo o controle dimensional das peças finais. Assim, a adição do percentual correto de água à massa cerâmica pode contribuir para a fabricação de telhas com as dimensões exigidas pela norma NBR 15310 (ABNT, 2009) e, também, diminui a perda na produção.

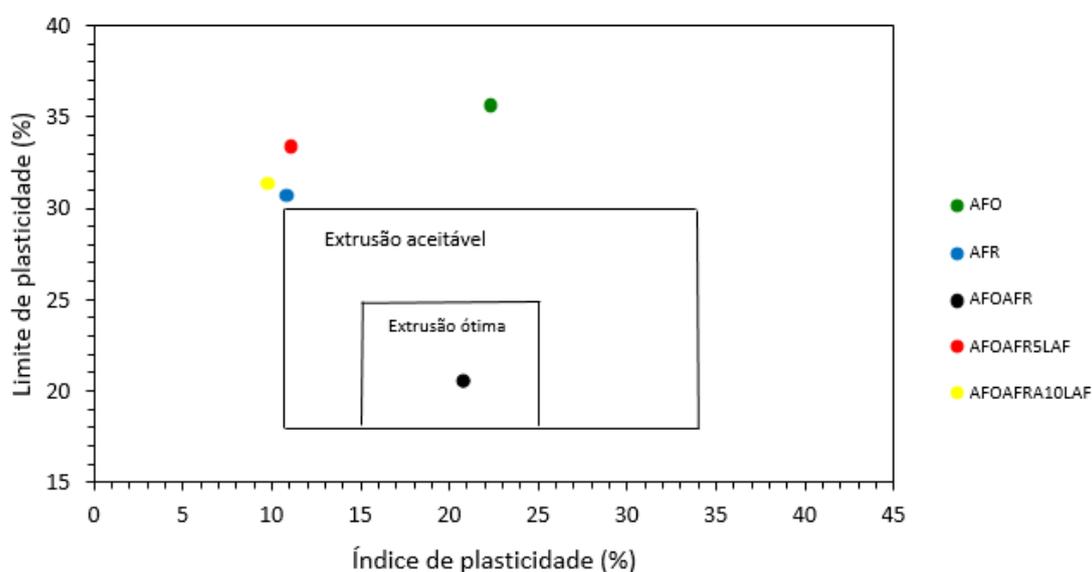


Figura 4.12 – Prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg.

4.1.5.2 – Massa específica aparente das peças queimadas (MEA)

A Tabela 4.2 apresenta a MEA dos corpos de prova (CPs) queimados das composições com seus respectivos desvios padrões.

A faixa de variação foi igual a 1,83 g/cm³ a 1,53 g/cm³ para a queima de 750°C. Já para a queima de 850°C a faixa de variação foi de 1,82 g/cm³ a 1,65 g/cm³ e de 1,87 g/cm³ a 1,90 g/cm³ para 950°C. SANTOS (1989) diz que a densidade máxima permitida para a cerâmica vermelha é abaixo de 2,7 g/cm³. Verifica-se um decréscimo, ou seja, uma leve redução no grau de empacotamento com o acréscimo do resíduo nas composições AFOAFR5LAF e AFOAFR10LF. Apesar da incorporação do resíduo ter gerado uma leve redução na massa específica, os valores obtidos ainda atendem ao

recomendado por SANTOS (1989), indicando que esse empacotamento pode ter contribuído para uma melhor consolidação das partículas na etapa de queima, induzindo a uma melhoria das propriedades tecnológicas (CANDIDO, 2012).

Tabela 4.2 – Massa específica aparente dos CPs queimados a 750, 850 e 950°C.

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
AFOAFR5LAF	1,53±0,09	1,65±0,11	1,90±0,01
AFOAFR10LAF	1,69±0,09	1,50±0,13	1,64±0,03

4.1.5.3 – Porosidade aparente (PA)

A Figura 14.13 apresenta a PA de cada composição quando submetidas às temperaturas sugeridas.

Observa-se que as peças cerâmicas mais porosas estão nas composições AFOAFR5LAF e AFOAFR10LAF na queima de 850°C e, na sequência, na composição AFOAFR10LAF na queima de 950°C. Isso se deve, provavelmente, ao menor grau de empacotamento das partículas e, também, pela granulometria mais grosseira do resíduo que pode ter contribuído para o não fechamento dos poros, já comentado anteriormente. Além do mais, as argilas estudadas apresentam um comportamento de queima refratário, e por serem pobres em óxidos fundentes, as temperaturas estudadas podem não ter contribuído para a completa sinterização das peças ocasionando o não o fechamento da porosidade fechada. Com isso, os finos de coque presentes no resíduos entram em combustão acarretando mais porosidade a cerâmica (VIEIRA *et al.*, 2007).

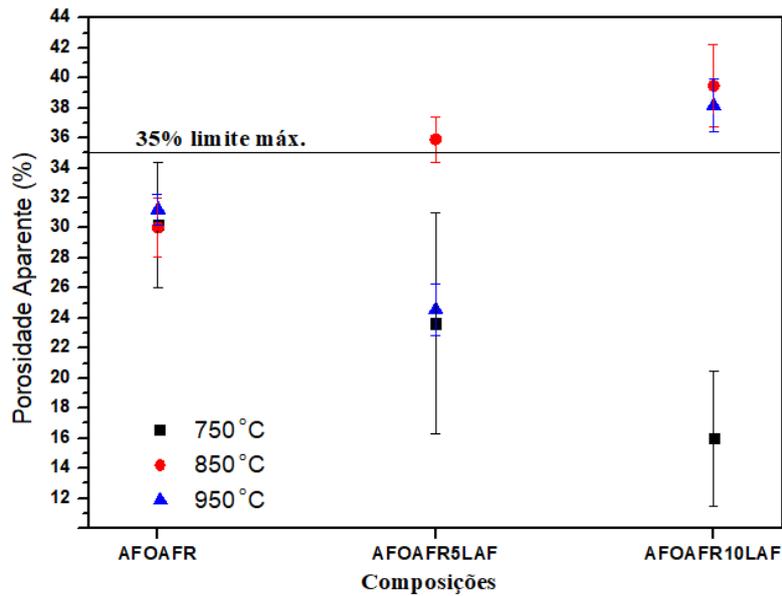


Figura 4.13- Porosidade aparente dos corpos de prova queimados nas temperaturas 750, 850 e 950°C.

4.1.5.4 - Absorção de água (AA)

A Figura 4.14 apresenta o percentual de AA das peças queimadas. Observa-se que, dentro de um erro estatístico, não há diferença significativa entre as temperaturas de queima para a composição AFOAFR. Além disso, nota-se que, para todas as temperaturas, os valores dessa propriedade ficaram dentro dos padrões exigidos pela norma NBR 15310 (ABNT, 2009). Para as composições AFOAFR5LAF e AFOAFR10LAF, as peças queimadas a 750 e 950°C obtiveram valores médios de absorção de água inferiores à 20%. Já as que foram queimadas à 850°C apresentaram valor superior à 21%, resultado esse que ultrapassa o máximo permitido por norma, comprovando o resultado obtido na PA.

Vale ressaltar que durante a queima da temperatura de 850°C tivemos alguns problemas com o forno de laboratório do tipo mufla, que não permitiu que o calor fosse dissipado de maneira uniforme para todas as peças, por esse motivo as peças queimadas nessa temperatura ficaram mais porosas apresentando valores diferentes.

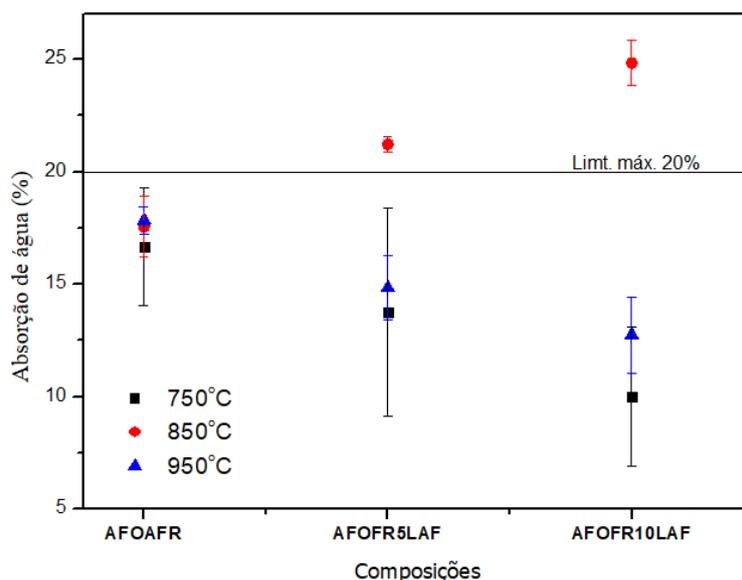


Figura 4.14 - Absorção de água dos corpos de prova queimados nas temperaturas 750, 850 e 950°C.

Os melhores resultados para absorção de água foram nas temperaturas de 750 e 950°C, sendo que a composição com adição de 10% em peso de lama de alto forno a que apresentou o menor índice para essa propriedade.

4.1.5.5 – Retração linear de queima

A Figura 4.15 apresenta os resultados da retração linear de queima, com seus devidos desvios padrões, das composições das peças queimadas.

Nas temperaturas de 750 e 850°C, não foi observado uma variação significativa, dentro do erro estatístico em todas as composições, ficando assim dentro dos padrões exigidos pela NBR 15310 (ABNT, 2009), com exceção da formulação AFOAFR, na temperatura de queima a 950°C, que obteve um valor de retração linear de queima elevado se posicionando no limite máximo exigido.

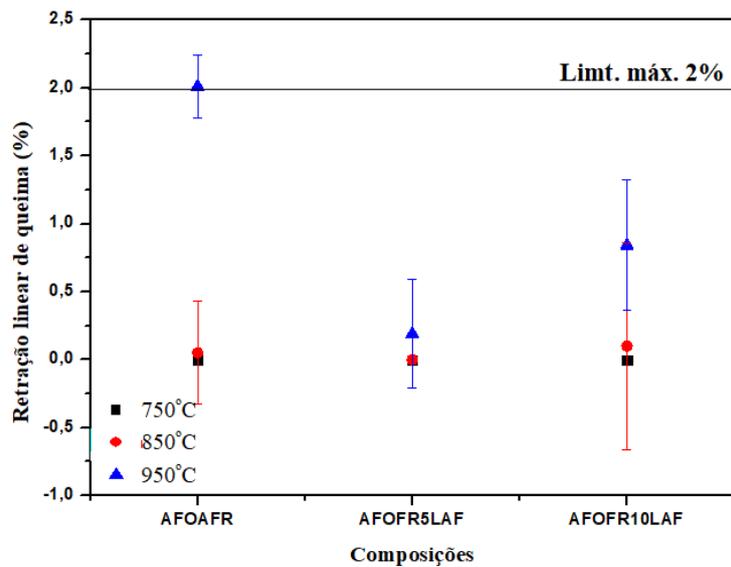


Figura 4.15- Retração linear de queima dos corpos de prova sinterizados nas temperaturas 750, 850 e 950°C.

4.1.5.6 – Resistência à flexão

A Figura 4.16 apresenta os valores de resistência a flexão dos corpos cerâmicos sinterizados. Nota-se que, para a temperatura de 750°C, a adição da lama de alto forno não influenciou de maneira significativa, dentro de um erro estatístico, na resistência à flexão. Entretanto, ao serem observados os valores médios dessa propriedade, nota-se que o resíduo induziu a uma leve queda de resistência mecânica. Esse comportamento pode ser explicado pela sinterização ineficiente que não contribuiu para o fechamento da porosidade aberta.

Observa-se que na temperatura de 850°C houve um aumento significativo na composição de AFOAFR5LAF, de 1,72%, já na composição de AFOAFR10LAF houve uma redução na resistência mecânica, de 0,07%. O comportamento descrito relativo à redução de resistência mecânica pode ser influenciado pela baixa interação do resíduo com a matriz de aluminossilicato, proveniente das argilas (DIAS, 2011). De acordo com o autor o resíduo é formado predominantemente por finos de coque e óxidos férricos, os finos de coque entram em combustão contribuindo para a elevação da porosidade, enquanto que os óxidos de Ferro III se oxidam formando hematita, evidenciado assim nos itens 4.1.5.3 e 4.1.5.4.

Na temperatura de queima de 950°C, houve um aumento de resistência em relação as demais queimas, isso acontece devido ao início da formação de fase líquida

que diminui a porosidade do material contribuindo assim para uma melhor resistência (PINHEIRO, 2010).

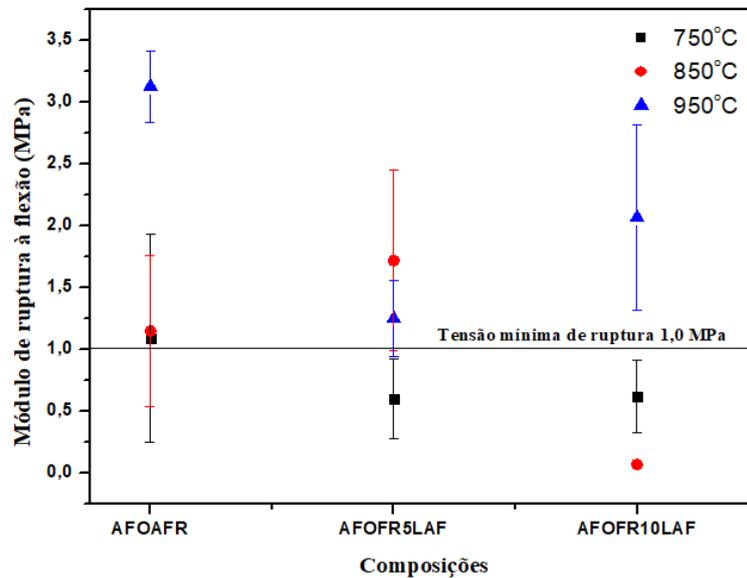


Figura 4.16- Resistência a flexão de queima dos corpos de prova queimados nas temperaturas 750, 850 e 950°C.

4.1.6 - Microscopia dos corpos de prova sinterizados

4.1.6.1 – Microscopia ótica

As Figuras 4.17; 4.18 e 4.19 mostram a microscopia ótica das peças sinterizadas nas temperaturas de 750, 850 e 950°C respectivamente. Nota-se uma coloração avermelhada, isto é devido a presença do óxido de ferro presentes nas argilas e no resíduo conforme indicado na composição química, Tabela 4.1. Além disso, observa-se a presença de quartzo, setas brancas; partículas pretas, provavelmente por composto de ferro, setas pretas; partículas avermelhadas provavelmente de hematita, círculos preto.

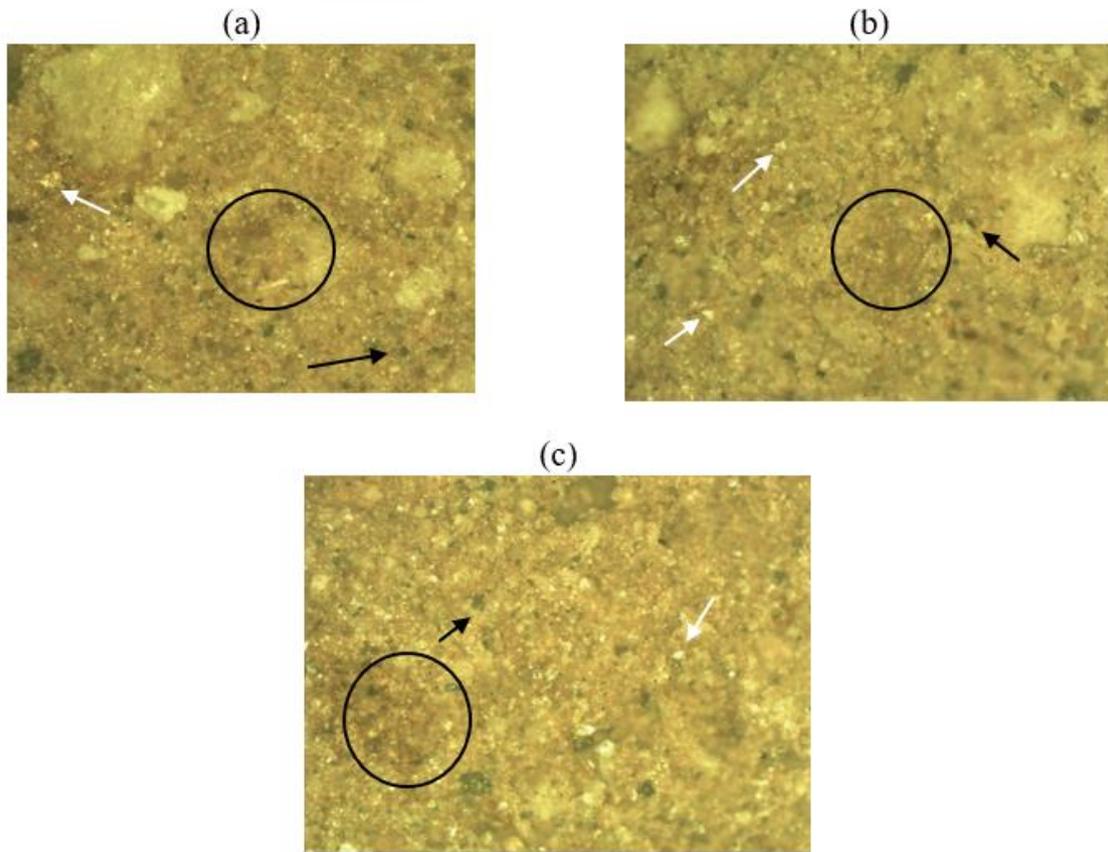


Figura 4.17 - Micrografia obtida por MO na queima de 750°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.

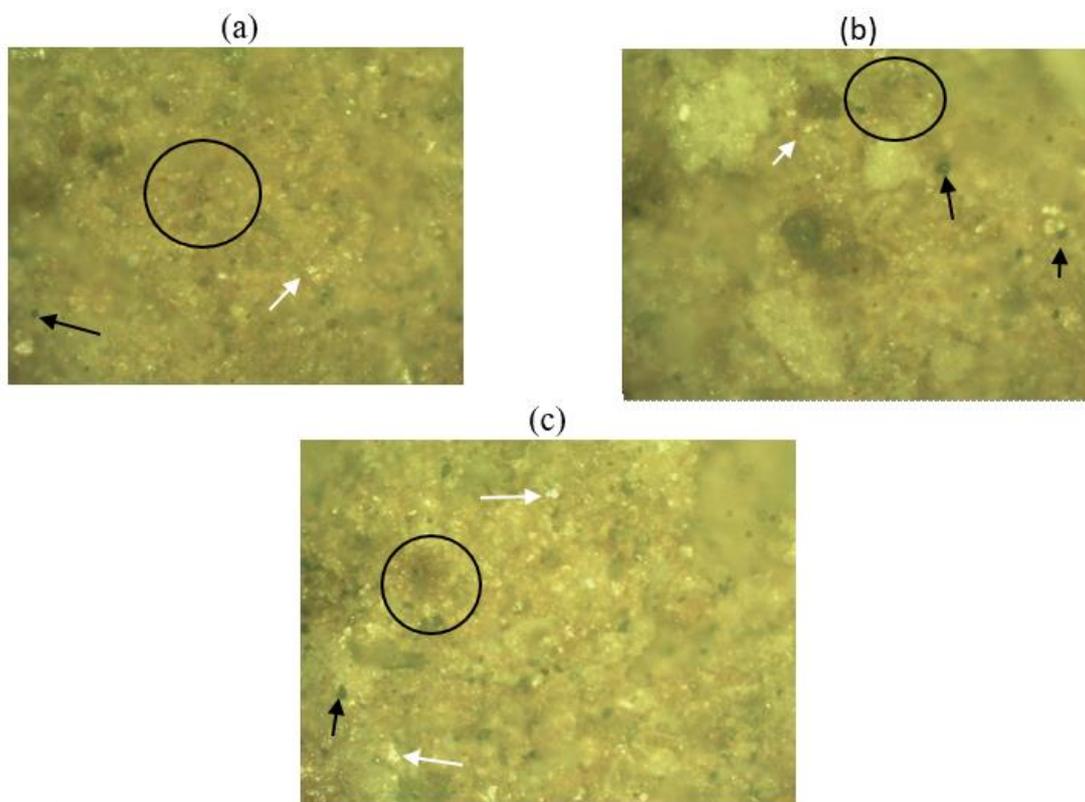


Figura 4.18 - Micrografia obtida por MO na queima de 850°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.

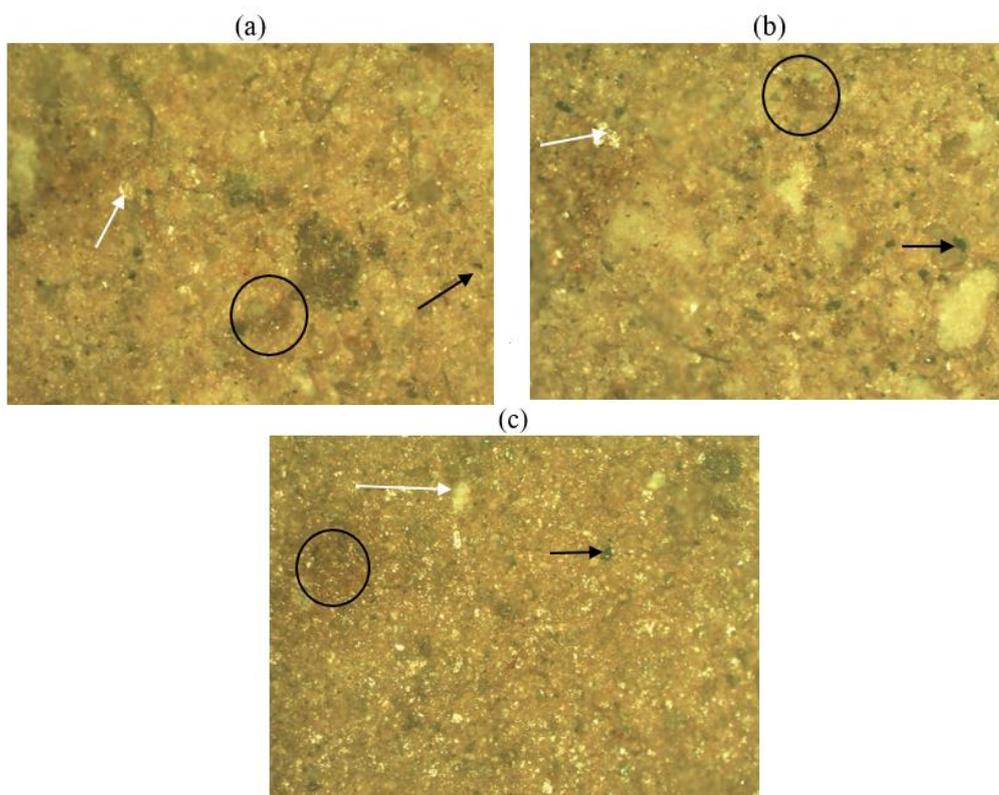


Figura 4.19 - Micrografia obtida por MO na queima de 950°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.

4.1.6.2 – Microscopia eletrônica de varredura

As Figuras 4.20; 4.21 e 4.22 apresentam as micrografias obtidas por MEV da região da fratura dos corpos de provas queimados nas temperaturas de 750, 850 e 950°C.

Pode-se observar que as Figuras (b) e (c) em comparação a Figura (a) apresenta uma região de fratura com maiores quantidades de defeitos tais como, poros e trincas, conforme mostram as setas. Estes defeitos são responsáveis pela redução de resistência das cerâmicas incorporadas com o resíduo (VIEIRA *et al.*, 2007).

Observa-se uma superfície rugosa, se é devido que até a temperatura de 900°C não há formação de fase líquida suficiente, evidenciada no DRX das peças sinterizadas, para se obter uma superfície lisa e com pouca quantidade de defeitos.

Portanto, é mais evidente a presença de poros e trincas na queima de 850°C, isso é devido a porosidade aparente e a absorção de água apresentadas nessas peças.

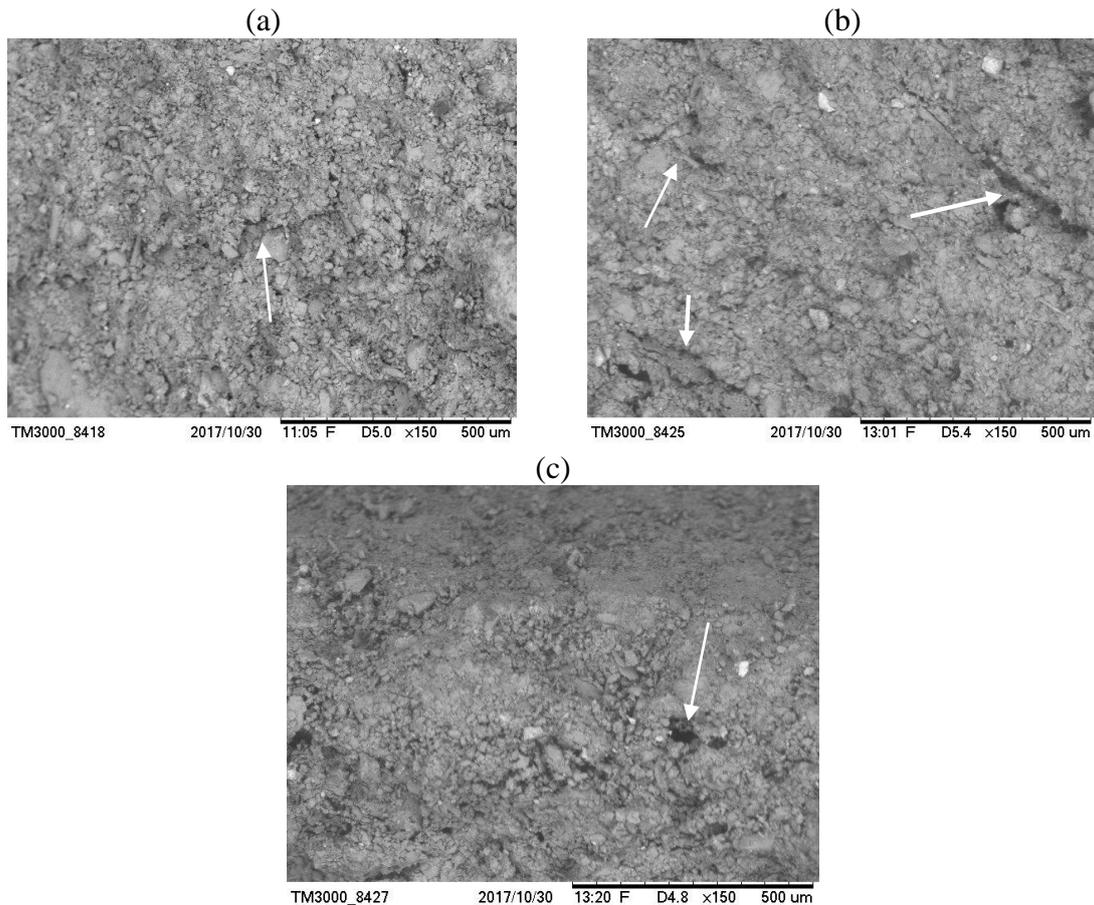


Figura 4.20 - Micrografia obtida por MEV na queima de 750°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.

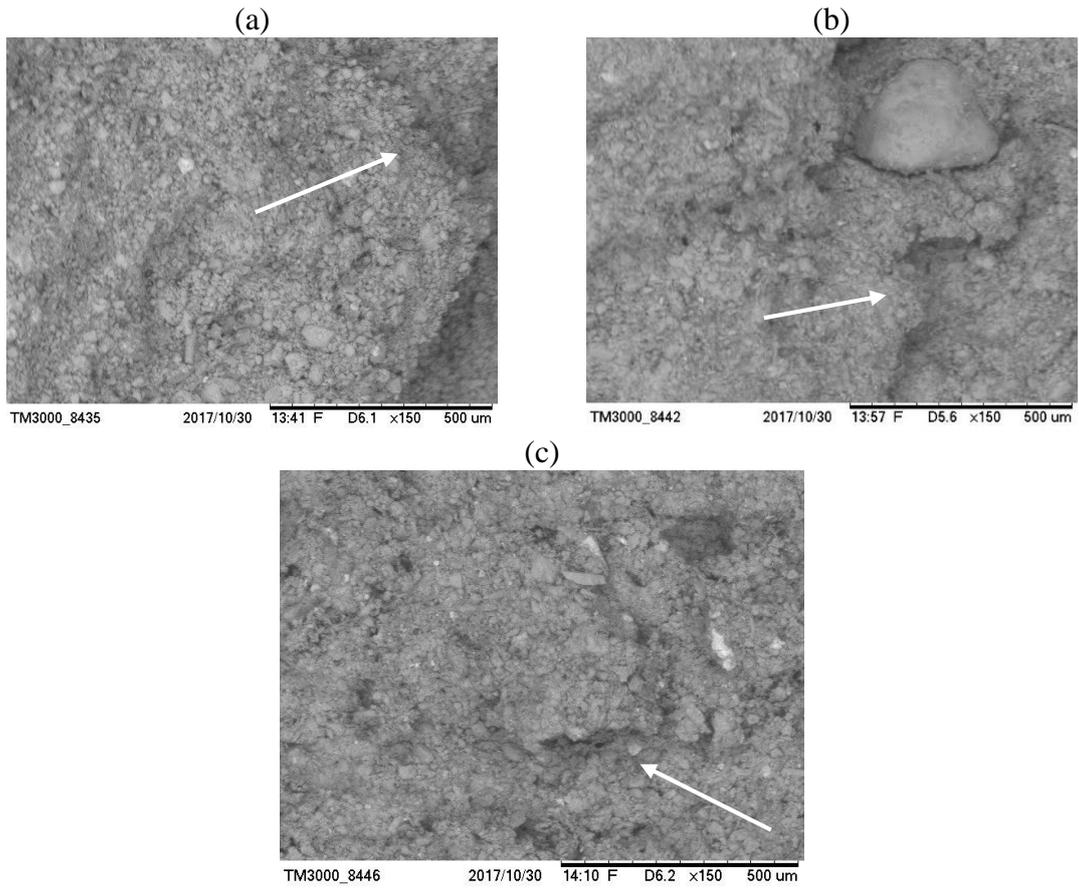
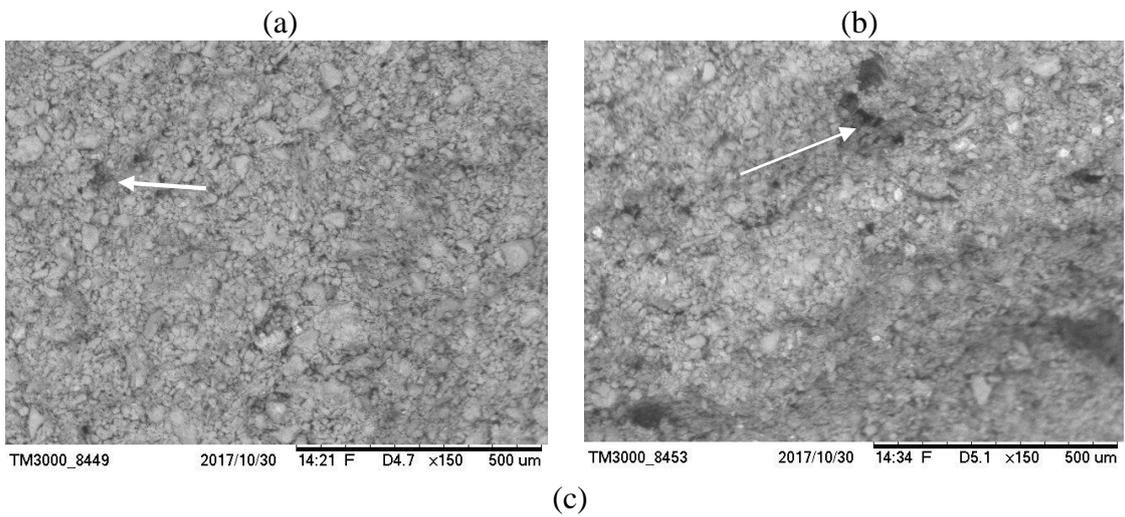


Figura 4.21 - Micrografia obtida por MEV na queima de 850°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.



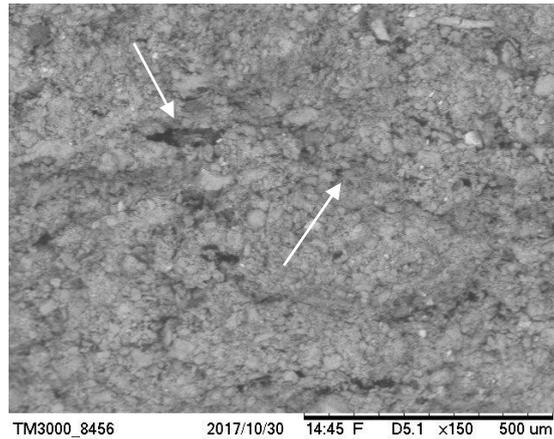


Figura 4.22 - Micrografia obtida por MEV na queima de 950°C, (a) AFOAFR (b) AFOAFR5LAF e (c) AFOAFR10LAF.

4.1.7 – Difração de raios-x dos corpos de prova sinterizados

As Figuras 4.23; 4.24 e 4.25 apresentam o DRX das queimas de 750, 850 e 950°C nas composições AFOAFR, AFOAFR5LAF e AFOAFR10LAF, respectivamente.

As fases cristalinas observadas em todas as composições são quartzo, mica muscovita e a hematita. Não é observada a presença de caulinita, pois em aproximadamente 500°C ocorre desidroxilação dessa fase transformando-a em metacaulinita, uma fase amorfa (CANDIDO, 2012).

As demais temperaturas apresentaram as mesmas fases cristalinas. Isso demonstra que não houve mudança de fases nas temperaturas estudadas.

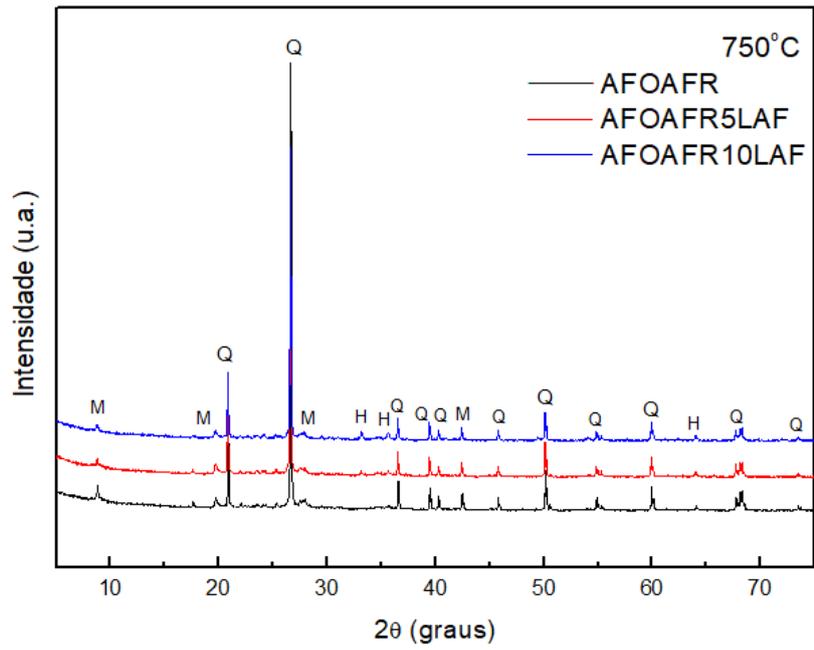


Figura 4.23 – Difratoograma de raios x da queima de 750°C. Q = quartzo; M = mica muscovita; H= hematita.

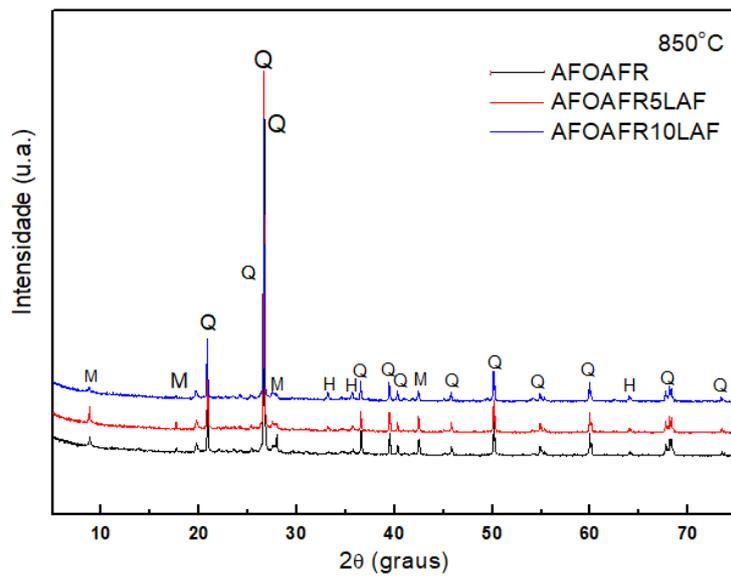


Figura 4.24 – Difratoograma de raios x da queima de 950°C. Q = quartzo; M = mica muscovita; H= hematita.

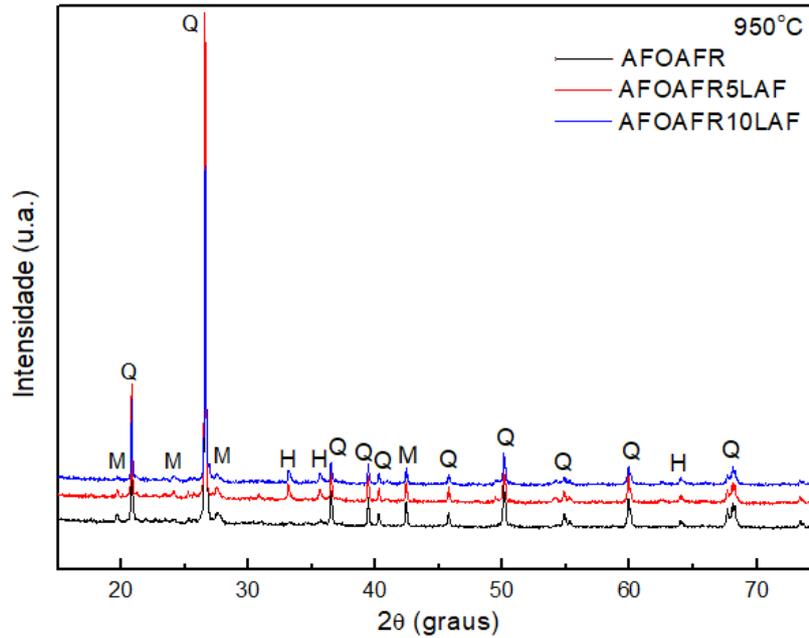


Figura 4.25 – Difratoograma de raios x da queima de 950°C. Q = quartzo; M = mica muscovita; H= hematita.

Assim, o estudo da incorporação da lama de alto forno em matriz argiloso permitiu inferir que o resíduo é constituído predominantemente de ferro e finos de coque, como relatado anteriormente. Também, pode-se observar uma granulometria apropriada para a incorporação em cerâmica vermelha, pois a distribuição granulométrica contribuiu para o controle da plasticidade da massa argilosa. Além disso, a incorporação da lama ajudou a controlar a porosidade das peças queimadas corroborando para obtenção de corpos com baixos índices de absorção de água e elevada resistência à flexão indicando que as composições estudadas podem ser usadas na fabricação de telhas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se afirmar que a incorporação do resíduo siderúrgico, lama de alto forno, em massa cerâmica argilosa, nas condições descritas nesse trabalho, é favorável para a produção de telhas cerâmicas, sendo a composição AFOAFR5LAF é a mais indicada, como se confirma na Figura 4.9 Diagrama de Winkler.

Os demais resultados obtidos permitiu as seguintes conclusões:

- As argilas forte e fraca, utilizadas pela empresa Menegalli, são constituídas por caulinita, quartzo, mica muscovita e anatásio, porém com preeminência da caulinita. Desta forma, as argilas cauliníticas podem contribuir para boa plasticidade do material uma vez que é o argilomineral responsável pelo desenvolvimento da plasticidade em mistura com a água;
- A caracterização da lama de alto forno mostrou que o resíduo é rico em ferro e as fases cristalinas presentes são hematita associado ao óxido de ferro III, caulinita que está associada ao silicato de alumínio e calcita associada ao óxido de cálcio. Assim, pode-se inferir que a lama de alto forno pode ser um potencial resíduo utilizado na composição mássica das argilas podendo contribuir para alcançar valores de resistência mecânica e absorção de água exigidos por norma para fabricação de telhas;
- O resíduo apresenta uma granulometria favorável a adição em massa argilosa, não alterando as propriedades tecnológicas exigidas em normas;
- O resíduo não modifica a trabalhabilidade da argila nas concentrações estudadas no trabalho, porém a sua adição não pode ultrapassar os 5%, pois pode interferir nas propriedades tecnológicas;
- A absorção de água nas composições sugeridas atenderam o limite estabelecido pela NBR 15310 (ABNT, 2009), com exceção a queima de 850°C com a adição do resíduo;

- A retração linear de queima em todos os testes não ultrapassou o limite estabelecido pela norma;
- A tensão mínima de ruptura após a queima para telhas cerâmicas para todas as composições estudadas apresentaram resultados acima do mínimo exigido.
- A microscopia ótica das peças queimadas revelou a presença de partículas associadas ao quartzo, mica muscovita e hematita, componentes presentes no DRX das argilas e do resíduo;
- A análise realizada por microscopia eletrônica de varredura, mostrou que as temperaturas usadas não permitiram uma formação de fase líquida tão eficiente. Com isso, foram observadas partículas que podem ter atuado como concentradores de tensão sendo ponto de iniciação de trincas;
- A análise de DRX das composições queimadas apresentou fases cristalinas semelhantes, como o quartzo, mica muscovita e a hematita, sendo essas as fases predominantes nesse material quando submetidas às temperaturas estudadas.

5.2 - SUGESTÕES

- Avaliar a influência de duas faixas de variação de massa específica nas propriedades tecnológicas das cerâmicas queimadas.
- Estudar temperaturas de queima superiores a 950°C;
- Realizar estudo da influência que o resíduo na economia energética durante a etapa de queima da cerâmica vermelha;
- Estudar o custo da incorporação do resíduo de lama de alto forno em composição mássica para fabricação de telhas;
- Estudar a dosagem das frações mássicas.

RERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. L. B.; MELO, G. C. B. Alternativas de usos e aplicações dos resíduos sólidos das indústrias independentes de produção de ferro-gusa do estado de Minas Gerais. **21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES – 094.** Belo Horizonte. Novembro de 2001.

AMARAL, J. F. **Formulação de massa cerâmica para a fabricação de telhas.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, 2016.

ARCELLORMITTAL – Disponível em <<http://tubarao.arcelormittal.com/index.asp>>. Acesso em junho de 2017, 19h30min.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – Disponível em <<http://abceram.org.br/>>. Acesso em abril de 2017, 14h.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Determinação do limite de liquidez: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** Determinação de limites de plasticidade: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Determinação da análise granulométrica dos solos. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:** Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado para resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:** Procedimentos para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007:** Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASTM C674-13, **Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA – Disponível em <<http://anicer.com.br/setor/>>. Acesso em abril de 2017, 15h.

BASTOS, F. A. **Avaliação do processo de fabricação de telhas e blocos cerâmicos visando a certificação do produto**. 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2003.

BETINI, D. G. **Inovação na tecnologia de produtos de cerâmica vermelha com uso de chamote em São Miguel do Guamá**. 2017. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará. Belém, 2007.

BETINI, D. G.; ICHIHARA, J. A. A logística reversa aplicada ao setor oleiro na região norte. **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Foz do Iguaçu, PR. Outubro de 2007.

BOSCO, J. G. **Caracterização do resíduo sólido oriundo da fabricação de ferro-gusa para utilização em cerâmica na construção civil**, 2 ed. São Paulo, 2009.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: S.A., 2012.

CAMARA, R. S.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Utilização de finos de brita em massa argilosa. **Revista Matéria**, v. 15. n. 3. pp. 480-487, 2010.

CAMPELO, N. S. *et al.* Estudo da utilização de resíduo cerâmico queimado (“chamote”) oriundo do polo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru – AM, como aditivo na fabricação de telhas. **Cerâmica Industrial**. 11, 2006.

CANDIDO, V. S. **Utilização de argilito e chamote de blocos de vedação na composição de massa de pavimento intertravado cerâmico - adoquim.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharias de materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, 2012.

CASTRO, R. J. S. **Formulação e caracterização de matérias-primas para revestimento cerâmico semi-poroso com adição de chamotes de telhas.** Dissertação (Mestrado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de construção Mecânica.** Vol. 3, 2ª ed. São Paulo: Mc Graw Hil, 1986.

CLEWS, F.H. **Clay: Its formation and characteristics.** Chap. 1. In: Heavy Clay Technology, Clews, F. H. London: Academic Press. 1969. pp. 1-16.

COELHO, A. C. V.; SANTOS, A. S.; SANTOS, H. S. Argilas especiais: o que são, caracterização e propriedades. **Química Nova.** v. 30. n. 1. pp 146-152, 2007.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.

DA CRUZ, M. J. A. C. **Comportamento e durabilidade de telhas cerâmicas em ambiente marítimo.** 2010. 398 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Portugal, 2010.

DAS, B. *et al.* **An overview of utilization of slag and sludge from steel industries.** Resources, Conservation & Recycling, In Press, 2006.

DIAS, C. A. C. M. **Reciclagem de lama de alto forno em cerâmica vermelha.** 2011. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia e ciências dos materiais) – Universidade do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2011.

DONATO, V. **Logística Verde.** Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2008.

FIGUEIREDO, J. D. C. **Aplicação de uma fração de resíduo do sheredder na fabricação de blocos cerâmicos estruturais.** 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

FEITOSA, A. O. **Influências das variáveis de processamento na cor e nas propriedades tecnológicas de cerâmicas estruturais**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2015.

FEITOSA, E. F. *et al.* Incorporação da escória do forno panela em formulação cerâmica: estudo das zonas de extrusão. **Congresso brasileiro de engenharia e ciências dos materiais**. 116-094. Natal-RN. 06-10 Novembro, 2016.

GOMES, C. F. Argila: o que são e para que serve. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1988.

GOMES, M. H. P. **Manual de Prevenção de Acidentes e Doenças do Trabalho nas Olarias e Cerâmicas Vermelhas de Piracicaba e Região**. São Paulo: Gráfica Universitária, 2010.

GRIM, R. E. **Clay mineralogy**. 2. ed. New York: McGraw Hill Book Company, 2003.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

IDROGO, A. A. A.; BEZERRA, M. C.C.; ACUNA, G. S. “Estudo sobre os desperdícios presentes no processo de fabricação de telha em uma indústria de cerâmica vermelha”. **XXXVI – Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP**. 226. João Pessoa-PB. 03-06 de Outubro de 2016.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em <<http://www.acobrasil.org.br/>>. Acesso em dezembro de 2017, 10h.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). Siderurgia Brasileira: princípios e políticas. Disponível em <<http://www.ibs.com.br/>>. Acesso em março de 2017. 13h.

JUNKES, J.A. **Formulação de produtos cerâmicos a partir de resíduos minerais usando o diagrama de fases do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$** . 2011. 148 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

LEE, P. W. **Principal Raw Materials Used in Classic Ceramics**. Chap. 2. In: Ceramics, Lee, P.W. New York: Reinhold publishing, 1961. pp. 7-19.

LOBATO, Natália C. C. **Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria siderúrgica**. 2014. 56 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

LOYOLA, L.C. **Programa de capacitação de recursos humanos na indústria cerâmica do estado do Paraná**. MINEROPAR/SERT. Curitiba, 1998.

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

MAKKONEN, H. T.; et al. "**Optimization of Steel Plant Recycling in Finland: Dusts, Scales and Sludge, Resources, Conservation and Recycling**". 35, 77-84, 2002.

MÁS, E. **Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha: os combustíveis**. ed. Polo produções Ltda.: São Paulo, 2002.

MONTEIRO, S. N. *et al.* **Produção industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de petróleo**. Construction and Building Materials. 21, 2007-2011, 2007.

MORAIS, C. A. *et al.* "Fluorescent Lamp Glass Waste Incorporation into Clay Ceramic: A Perfect Solution". *The Minerals, Metals & Materials Society*. v. 68. n. 19. pp 2425–2434, 2016.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JUNIOR; M. **As matérias-primas cerâmicas. Parte I: o perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos**. Cerâmica Industrial 6(2), 2001. pp. 28-39

MOURÃO, M. B. **Siderurgia para não siderurgistas**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), São Paulo, 251p., 2004

MOURÃO, M. B. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo. ABM. 2011.

MUKHERJEE, Atanu; ZIMMERMAN, Andrew R. **Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures**. Geoderma v. 193-194, p. 122–130, 2013. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706112003382?via%3Dihub>>. Acesso em agosto de 2017. 14h

OLIVEIRA, A. P. N.; MONTEDO, O. R. K; PIZETE, J. CASAGRANDE, M. Matérias primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influência sobre as propriedades do produto final. **Cerâmica Informação**, n. 10, p. 57-65, 2000.

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

OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA, J. N. F. Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestruturas de cerâmica vermelha. **Cerâmica** **54**, 167-173, 2008.

OLIVEIRA, F. R.; SILVEIRA, C. S.; ASSIS, P. S. “Análise da lama de alto-forno com insumo em siderúrgicas e cerâmicas”. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. v. 12, n. 1, 21-25, 2017.

ORDONEZ, M. F. C. **Efeito do empacotamento de partículas nas propriedades mecânicas e tribológicas de misturas de argila-rocha**. 2015. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e ciência dos materiais) - Universidade de Caxias do Sul. Rio Grande do Sul, 2015.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massa para a cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, **02** (01/02). Janeiro/Abril, 1997.

PREDASSINI, J. **Caracterização do sienito piqueri como fundente cerâmico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

PINHEIRO, R. M.; VIEIRA, C. M. F.; RODRIGUEZ, R. S.; MONTEIRO, S. N. Reciclagem de resíduo proveniente da produção de papel em cerâmica vermelha. **Rev. Matéria**, 13 (1) 220-227, 2008.

PINHEIRO, R. M.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. (2010). In: **Caracterização de matérias-primas para fabricação de adoquim**. Anais: 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Foz do Iguaçu, Paraná. Disponível em <http://www.metallum.com.br/54cbc/trabalhos_tecnicos.asp?Id=3>. Acesso em agosto de 2017. 13h.

PUREZA, J. C. C. **Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha**: aspectos tecnológicos e ambientais. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

RAMOS, I. S.; ALVES, M. G.; ALEXANDRE, J. Diagnóstico do Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes – RJ. **Cerâmica Industrial**, São Carlos, 11 (1), 2006.

RIBEIRO, M.J.; FERREIRA, A.A.L.; LABRINCHA, J.A. Aspectos Fundamentais sobre a Extrusão de Massas de Cerâmicas Vermelhas. **Revista Cerâmica Industrial**, São Paulo, v.8, n.1, p.37-42, jan./fev., 2003.

ROCHA, A. L. *et al.* A produção industrial da cerâmica vermelha em São Miguel do Guamá e as recentes inovações adotadas pelo segmento em âmbito nacional. **Revista de arquitetura da IMED**. Passo Fundo, RS. v. 2, n.1, 2013, p. 01-09.

SÁNCHEZ, E.; GINES, F.; AGRAMUNT, J. V.; MOZÓ, M. “Control de calidad de las arcillas empleadas em la fabricación de los sopotes de baldosas ceámicas”. **Qualicer 98**. Castellon, Espanha. 1997.

SANTOS JÚNIOR, E. L. *et al.* “Incorporação de escória de aciaria em cerâmica vermelha”. **49º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. 5-36. São Pedro-SP. 2005.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia das argilas**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Bücher Ltda, 1989.

SANTOS, O. C. **Formulação de bloco intertravados cerâmico com adição de resíduos urbanos e industriais**. 2007. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007.

SANTOS, D. M. S. *et al.* Análise da viabilidade da incorporação do pós de despoeiramento siderúrgico em cerâmica vermelha. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 1303. Natal-RN. 06-10 Novembro de 2016.

SERRA E SOUSA, A. V.; ABRANTES, V. **Manual de aplicação de telhas cerâmicas**. Coimbra. APICER/CTVC/IC FEUP. 1998.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas. **Cerâmica Vermelha**: Estudos de Mercados. Setembro, 2008.

SILVA, F. A. N. **Caracterização microestrutural e avaliação ambiental de cerâmicas argilosas com incorporação do resíduo borra de petróleo encapsulada.** 2000. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e ciência dos materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes-RJ, 2000.

SILVA, M.A., PAES, JR., H.R., HOLANDA, J.N.F. **Reuse of ornamental rock-cutting waste in aluminous porcelain.** Journal of Environmental Management, v. 92: 936-940, 2011.

SOARES, R. A. L.; NASCIMENTO, R. M. O processo produtivo e a qualidade do produto cerâmico estrutural. In: **II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica.** Anais. João Pessoa – PB, 2007.

SOUZA, C. C.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. “Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro”. **Revista Matéria**, 13 (1) 194-202, 2008.

TUBINO, L.C.B., BORBA, P. Dossiê Técnico: Etapas do processo cerâmico a sua influência no produto final- massa, extrusão, secagem e queima. SENAI. 2006.

VICENZI, J. **Efeito da adição de chamota em uma massa cerâmica de argila vermelha.** 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

VIEIRA, C.M.F., FEITOSA, H.S., MONTEIRO, S.N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot - **Cerâmica Industrial** 8: 42-46, 2003.

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.

VIEIRA, C.M.F. *et al.* Incorporation of fine steel sludge waste into red ceramic. In: **Materials Science and Engineering A** 427: 142-147, 2006.

VIEIRA, C. M. F; MONTEIRO; S. N. “Cerâmica argilosa incorporada com resíduo oleoso proveniente do setor petrolífero”. **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, pp. 217-222, 2006.

VIEIRA, C. M. F.; DIAS, C. A. C. M.; MOTHÉ, A. V.; “*et al.*”. Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha. **Cerâmica**. v. 53 n° 328 São Paulo-SP. 2007.

VIEIRA, C. M. F.; INTORNE, S. C.; VERNILLI JR, F.; “*et al.*”. Cerâmica vermelha incorporada com lama fina de aciaria. **Revista Matéria**. v. 12 n°. 2, pp. 269-275, 2007.

VIEIRA, C. M. F., SÁNCHEZ, R., MONTEIRO, S. N. Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Construction and building materials**, v. 22, p. 781 – 787, 2008.

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